

Università degli Studi di Napoli Federico II



Scuola di Dottorato in Ingegneria Industriale
Dottorato di Ricerca in Ingegneria dei Sistemi Meccanici
XXII Ciclo

Caratterizzazione Sperimentale di Elettroiniettori Common Rail
EURO5 alimentati con Gasolio e Biodiesel

Coordinatore del Dottorato
Ch.mo Prof. Ing. Raffaele Tuccillo

Relatore
Ch.mo Prof. Ing. Adolfo Senatore

Co-Relatore
Dott. Luigi Allocca

Dottorando
Ing. Antonino Maresca

*«La scienza non è nient'altro che una perversione
se non ha come suo fine ultimo
il miglioramento delle condizioni dell'umanità.»*

Nikola Tesla

Indice

Introduzione.....	2
Capitolo I - IL SISTEMA di INIEZIONE COMMON RAIL	9
I.1. Introduzione.....	9
I.2. Classificazione dei sistemi di iniezione.....	11
I.3. Il Sistema Common Rail.....	13
I.4. Il Sistema Bosch Common-Rail Unijet-Multijet.....	14
I.5. Principio di funzionamento del Sistema Unijet.....	15
I.5. Sistema di iniezioni multiple: Multijet	27
Bibliografia.....	31
Capitolo II - TIPOLOGIA DEI COMBUSTIBILI PER AUTOTRAZIONE	32
II.1. Introduzione.....	32
II.2. I combustibili per motori a ciclo Diesel utilizzati nella sperimentazione.....	34
II.2.1. Il gasolio.....	34
II.2.2. Il biodiesel.....	37
II.3. Oli per la produzione di biodiesel.....	40
II.4. Proprietà chimico-fisiche dei biodiesel	41
II.3. Impatto dei biodiesel sulle prestazioni e sulle emissioni.....	46
II.4. Impatto economia mondiale.....	54
II.5. Ciclo della CO ₂	56
II.7. Cenni sulle normative sulle emissioni inquinanti dei motori Diesel.	61
Bibliografia.....	67
Capitolo III - LA FISICA DELLO SPRAY	70
III.1. Introduzione.....	70
III.2. Energia di atomizzazione.	71
III.3. Viscosità del fluido.....	72
III.4. Densità dello spray.....	73
III.5. Le condizioni fluidodinamiche nell'iniettore.....	74
III.6. Il Break Up primario.....	74
III.6.1. I regimi di break up primario.....	76
IV.7. Il break up secondario.	79
IV.8. Le dimensioni delle particelle.	81
III.9. Collisione delle particelle.....	82
III.10. Evaporazione e combustione del gasolio.	83
III.11. L'interazione tra spray e pareti solide.....	84
III.11.1 Fenomeno di wall impingement.	86
III.12. Parametri geometrici dello spray.....	92
III.13. Camere di combustione di tipo quiescente	94
III.14. Cenni sul moto dell'aria.....	95
Bibliografia.....	101
Capitolo IV - Apparato sperimentale e metodologie di prova.....	102
IV.1. Apparato sperimentale per l'analisi del getto di combustibile.....	102
IV.2. Metodologia e procedure di indagine.....	114
Bibliografia.....	119
Capitolo V - misure ed elaborazione dati	120
V.1. Misure del fuel injection rate e caratterizzazione dei getti	120
V.2. Analisi del fuel injection rate	122
V.3. Analisi della portata totale.....	128
V.4. Analisi delle Curve di penetrazione	133
Bibliografia.....	149
CONCLUSIONI.....	150

INTRODUZIONE

Nel corso degli ultimi anni la politica dei trasporti dell'UE ha inteso promuovere la sostenibilità e l'efficienza dei trasporti mediante l'adozione di specifiche misure normative, ha proseguito nell'attuazione e nel completamento delle reti transeuropee anche realizzando gli obiettivi in materia di sicurezza stradale. La necessità di assicurare la sostenibilità ambientale della politica comune dei trasporti si è affermata con sempre maggiore urgenza negli ultimi anni, soprattutto alla luce del suo grande impatto sull'ambiente e della necessità per l'UE di mantenere gli impegni relativi alla riduzione dei gas serra assunti nell'ambito del protocollo di Kyoto, nonché di contenere la propria dipendenza energetica dall'esterno. Le interrelazioni tra la politica dei trasporti e quelle in materia di ambiente e di energia sono state pertanto ribadite dalle istituzioni dell'UE in varie sedi in considerazione del notevole contributo che i trasporti possono dare al perseguimento di importanti obiettivi comunitari in materia.

Sono attualmente all'esame delle istituzioni dell'UE alcune misure di carattere trasversale intese a promuovere la sostenibilità ambientale riconducibili, con specifico riguardo alla politica dei trasporti, ai seguenti settori di intervento:

- ✓ La promozione di carburanti alternativi e maggiormente rispettosi dell'ambiente che costituisce, in particolare, l'oggetto di un piano di azione nel settore della biomassa (COM(2005)628), della strategia dell'UE per i biocarburanti (COM(2006)34) e di una proposta di direttiva sulla qualità dei carburanti (COM(2007)18).
- ✓ La lotta contro i cambiamenti climatici e la riduzione delle emissioni che sono affrontati nella strategia tematica sull'inquinamento atmosferico (COM(2005)446), in una proposta di direttiva relativa alla qualità dell'aria ambiente (COM(2005)447) e nella strategia tematica sull'ambiente urbano (COM(2005)718).
- ✓ L'efficienza energetica e le energie alternative oggetto di una proposta di regolamento sull'impiego dell'idrogeno allo stato liquido o gassoso per la propulsione di veicoli a motore (COM(2007)593).
- ✓ La tassazione, con la proposta di direttiva in materia, di tasse basate sulle emissioni delle autovetture (COM(2005)261) e la proposta di direttiva sul coordinamento della tassazione della benzina senza piombo e del gasolio utilizzati come carburante per motori (COM(2007)52).

Sono, inoltre, all'esame delle istituzioni dell'UE altri documenti che propongono misure specifiche volte a favorire la sostenibilità delle singole modalità di trasporto:

- ✓ Per quanto riguarda il **trasporto su strada** si segnala una comunicazione sulla riduzione delle emissioni di CO₂ delle autovetture e dei veicoli commerciali leggeri (COM(2007)19), il libro verde

sulla mobilità urbana (COM(2007)551) e la proposta di direttiva relativa alla promozione di veicoli stradali puliti e a basso consumo energetico (COM(2007)817).

- ✓ Nel settore del **trasporto aereo** è stata presentata una proposta di regolamento sull'integrazione del trasporto aereo nel sistema UE di scambio di quote di emissione di CO₂ (COM(2006)818).
- ✓ Con specifico riferimento al **trasporto marittimo**, oltre ad una serie di documenti di carattere generale che sottolineano l'importante contributo che può essere dato alla riduzione dell'inquinamento grazie al trasferimento del traffico merci dal trasporto su strada a quello marittimo, è stata presentata una proposta di direttiva relativa all'introduzione di sanzioni per l'inquinamento provocato dalle navi (COM(2008)134).
- ✓ Infine, con riferimento al **trasporto ferroviario** si segnala una comunicazione sulla creazione di una rete ferroviaria a priorità merci (COM(2007)608) nella quale si sottolinea la necessità di trasferire il trasporto merci dalla strada alla ferrovia al fine di ridurre l'impatto ambientale.

Le emissioni in atmosfera dovute alla mobilità di persone e merci su strada rappresentano una delle maggiori sorgenti di inquinamento dell'aria.

Consultando l'Inventario nazionale delle emissioni in atmosfera emerge che il settore "trasporti stradali" costituisce la principale fonte di inquinamento, soprattutto in corrispondenza delle aree urbane, per inquinanti come ossidi di azoto (NO_x), composti organici volatili (VOC, in particolare benzene), monossido di carbonio (CO); inoltre il settore dei trasporti stradali è responsabile di una quota considerevole delle emissioni di particolato (in particolare polveri fini, ordine di decine di µm, e nanopolveri, quelle maggiormente responsabili dei danni alla salute) e di anidride carbonica (CO₂), il principale gas serra.

Gli Inventari nazionali perseguono l'obiettivo di fornire, alle istituzioni e agli altri attori coinvolti, l'adeguato contributo conoscitivo per un governo dei problemi posti all'ambiente e alla qualità della vita dalle emissioni in atmosfera. Un Inventario nazionale delle emissioni non è soltanto lo strumento conoscitivo che consente di individuare le fonti di emissione maggiormente responsabili dell'inquinamento dell'aria, ma costituisce un preciso obbligo per gli Stati che si sono impegnati a contenere le emissioni nell'ambito di diverse convenzioni e protocolli internazionali. In particolare costituisce il mezzo per dimostrare il rispetto degli impegni di contenimento o riduzione delle emissioni di gas serra nell'ambito della Convenzione quadro sui cambiamenti climatici (New York, 1992) e del suo protocollo attuativo (Kyoto, 1997), e di contenimento o riduzione delle emissioni di ossidi di zolfo e azoto, composti organici volatili, ammoniaca, metalli pesanti e composti organici persistenti nell'ambito della Convenzione di Ginevra sull'inquinamento atmosferico transfrontaliero (1979) e dei suoi protocolli attuativi (tra questi Oslo, 1994; Aarhus, 1998; Gotenborg, 1999). L'inventario consente inoltre di monitorare il rispetto di

direttive europee già emanate o di prossima emanazione che pongono limiti sempre più restrittivi sia alle emissioni complessive nazionali che a particolari categorie di sorgenti come autoveicoli, grandi impianti di combustione, attività industriali che utilizzano solventi.

Dati recenti tratti dall'inventario nazionale delle emissioni atmosferiche mostrano che, a fronte di una diminuzione delle emissioni dovute alle attività di produzione di energia elettrica e ai grandi impianti di combustione, in particolare per quelle emissioni sottoposte a controllo come gli ossidi di zolfo, gli ossidi di azoto e le particelle sospese totali, non si è riscontrata una altrettanto sostanziale diminuzione delle emissioni dovute al trasporto su strada.

Questo principalmente a causa di due fattori concomitanti: la lentezza del processo di sostituzione del parco esistente con quello dotato di migliori tecnologie di abbattimento delle emissioni e allo stesso tempo l'incremento del parco circolante, delle percorrenze e quindi dei relativi consumi di combustibile.

Il settore dell'automotive ha recepito e si fa carico delle responsabilità che l'opinione pubblica prima e le Istituzioni UE poi gli attribuisce come concorrente principale al cambiamento del microclima delle metropoli ed in generale al cambiamento climatico su scala mondiale.

Esso si è assunto l'impegno di perseguire attraverso l'adozione delle tecnologie più innovative il rispetto delle normative comunitarie ed i principi di ecostenibilità nella produzione dei motori e dei veicoli in genere.

L'industria motoristica, nell'intento di rispettare le normative sempre più stringenti sulle emissioni inquinanti, di ridurre i consumi di combustibile e di utilizzare combustibili alternativi a quelli minerali, sono impegnati nel riprogettare, sviluppare ed ottimizzare a costi contenuti i componenti costituenti il motore a combustione interna utilizzando le tecnologie innovative emergenti nel settore automotive senza penalizzare le prestazioni del motore e del veicolo quali sicurezza, guidabilità e comfort.

I motori a combustione interna sono macchine motrici termiche che si propongono di convertire in lavoro meccanico la parte più grande possibile dell'energia liberata bruciando combustibili entro la macchina stessa. La combustione controlla la conversione dell'energia chimica del combustibile in calore, costituendo così la fase principale del ciclo di lavoro del motore; essa ne influenza infatti le prestazioni (potenza sviluppata e consumi di combustibile) e l'impatto esercitato sull'ambiente (composizione dei gas di scarico).

La combustione è un complesso processo di natura chimico-fisico, attraverso il quale il combustibile si ossida liberando calore. Il suo inizio sviluppo e completamento dipendono dalle caratteristiche e dalla velocità delle reazioni chimiche, dalle condizioni di trasporto di massa ed energia che si verificano nella zona di reazione e dallo scambio di calore con l'ambiente circostante.

Per velocità di combustione si intende la rapidità con cui avvengono le reazioni di ossidazione del combustibile. Per autoaccensione di una miscela di combustibile si intende il risultato finale di un insieme

di reazioni di prefiamma, le quali liberando calore, e fornendo una serie di prodotti instabili di parziale ossidazione, portano all'avvio del processo di combustione senza l'intervento di una sorgente d'accensione esterna. Questa condizione si verifica quando l'energia rilasciata dalle prime reazioni chimiche supera la quantità di calore ceduta dal sistema reagente all'ambiente esterno. Come conseguenza la temperatura della miscela aumenta, accelerando rapidamente le varie reazioni di ossidazione, la cui velocità dipende essenzialmente dalla temperatura. L'autoaccensione di una miscela che si trovi allo stato gassoso e perfettamente omogenea, è controllata dai seguenti fattori: temperatura, pressione, composizione (rapporto aria/combustibile) e tempo di induzione (chiamato anche ritardo all'accensione, definito come l'intervallo di tempo che passa tra l'istante in cui la miscela, di data composizione, è portata in prefissate condizioni di temperatura e pressione ed il momento in cui la combustione si avvia in modo apprezzabile). Un motore ad accensione per compressione, comunemente identificato come a ciclo diesel, è caratterizzato dal fatto di presentare un rapporto volumetrico di compressione sufficientemente elevato ($14 \div 24$), da provocare un aumento di $500 \div 600$ °C nella temperatura della carica d'aria, immessa nel cilindro durante la fase di aspirazione. Il combustibile viene iniettato sotto forma di un spray fine nell'aria ad alta pressione e temperatura, poco prima che il pistone raggiunga il PMS. Esso vaporizza e si mescola con l'aria, formando una miscela aria-combustibile, la quale si accende spontaneamente dopo ritardi tipici dell'ordine dei millisecondi.

Il conseguente aumento di pressione nel cilindro accelera le reazioni di preossidazione di quella parte di miscela aria-combustibile già formata, che si accende e brucia rapidamente portando la temperatura dei gas t_{gas} a valori prossimi ai 2000 °C e la pressione a $9 \div 14$ MPa. Di conseguenza, la vaporizzazione e diffusione dei vapori del restante combustibile, ancora liquido, viene accelerata notevolmente. L'iniezione continua fino a quando la quantità di combustibile richiesta è stata introdotta nella camera, passando attraverso i vari processi di polverizzazione, vaporizzazione, diffusione e combustione.

Infine durante la fase di espansione, il mescolamento dell'aria rimasta nel cilindro con i gas combusti o parzialmente ossidati, porta al completamento della combustione e quindi ai suoi prodotti che vengono allontanati durante la successiva fase di scarico.

Nei gas di scarico, come già anticipato, sono contenuti diversi inquinanti, come: NO_x , VOC (in particolare benzene), CO, una grande varietà di idrocarburi derivanti dalla combustione o decomposizione parziale del combustibile (chiamati sinteticamente HC), particelle solide portate in sospensione dai gas derivate dall'ossidazione incompleta del combustibile o da composti metallici ed additivi (genericamente dette particolato), prodotti di ossidazione di impurità del combustibile (quali lo zolfo) e anidride carbonica (CO_2).

Al di là dei dettagli sulla cinetica chimica delle reazioni che avvengono durante il complesso (e ancor sconosciuto) processo di combustione, le principali variabili motoristiche che influenzano la tipologia e la quantità dei vari inquinanti allo scarico di un motore ad accensione per compressione sono:

- ✓ Le interazioni aria/combustibile (dosaggio locale e globale, moti di turbolenza).
- ✓ Il valore dell'anticipo all'accensione rispetto il PMS.
- ✓ Il rapporto superficie/volume della camera di combustione.
- ✓ La natura e la quantità di depositi in camera di combustione.
- ✓ Il regime di rotazione e le condizioni di carico del motore.
- ✓ L'efficacia del sistema di raffreddamento.
- ✓ L'angolo di contemporanea apertura delle valvole.
- ✓ Ricircolo di parte dei gas combusti in aspirazione.
- ✓ La contropressione incontrata allo scarico.
- ✓ Rapporto di compressione e grado di sovralimentazione.

Le azioni che si possono intraprendere per ridurre la formazione degli inquinanti di tipo gassoso (NO_x , CO, HC) si possono riassumere schematicamente in:

- ✓ Adozione del ricircolo di parte dei gas di scarico, per ottenere un abbassamento della temperatura massima di combustione.
- ✓ Scelta appropriata dell'istante di avvio dell'iniezione, da cui dipende lo sviluppo di pressione e temperatura nel cilindro.
- ✓ Controllo della portata di combustibile iniettato e delle caratteristiche dello spray, che condizionano lo sviluppo della combustione.
- ✓ Ottimizzazione del disegno dei condotti di aspirazione e della camera di combustione, per controllare la turbolenza della carica.
- ✓ Adozione della turbosovralimentazione con interrefrigerazione della carica compressa (per abbassare le temperature) e riduzione del rapporto di compressione.
- ✓ Accurata manutenzione del sistema di alimentazione combustibile e motore in genere, per conservare nel tempo i rapporti di miscela ottimali stabiliti inizialmente.
- ✓ Utilizzo di combustibili (sia minerali sia alternativi) di migliori caratteristiche (minori variazioni di densità e viscosità, con un limite alla temperatura di fine distillazione e al contenuto in idrocarburi aromatici, ecc...).

Per quanto riguarda la formazione di particolato durante il processo di combustione, questa è favorita:

- ✓ Dalla massa di combustibile non mescolato all'aria e dal suo rapporto di equivalenza (α_s/α), a loro volta influenzati da: ritardo all'accensione (ossia: caratteristiche chimico-fisiche (in particolare

numero di cetano) del combustibile, rapporto di compressione, anticipo di iniezione), portata di combustibile iniettata e durata dell'iniezione (parametri del sistema di iniezione).

- ✓ Dalla lentezza della miscelazione combustibile-aria condizionata da: turbolenza (forma dei condotti e della camera di combustione); rapporto di miscela globale (ossia carico del motore); portata iniettata e distribuzione del combustibile (geometria iniettori e pressione di iniezione).
- ✓ Dalla temperatura di combustione, determinata dal: rapporto aria/combustibile, dal rapporto di compressione e/o di sovralimentazione, dalle perdite di calore per raffreddamento.

Le particelle carboniose prodotte possono tuttavia essere più o meno completamente ossidate, prima della loro espulsione dal cilindro, a seconda:

- ✓ Del valore della temperatura dei gas combusti, legata alla curva di rilascio del calore, al rapporto di miscela ed alle perdite termiche attraverso le pareti.
- ✓ Della disponibilità di ossigeno, dovuta principalmente al valore del rapporto aria/combustibile globale ed al tipo di miscelamento ottenuto dai prodotti della combustione.
- ✓ Del tempo, durante il quale le reazioni di ossidazione possono completarsi, determinato dal regime di rotazione del motore.

In conclusione, si può affermare che è possibile contenere le emissioni di particolato attraverso:

- ✓ L'utilizzo di un combustibile di caratteristiche migliori dei tradizionali gasoli minerali prevedendo in particolare : una drastica riduzione di zolfo, un restringimento del campo di tolleranza di densità e viscosità (migliore controllo aria/combustibile), una limitazione della temperatura di fine distillazione, ecc...
- ✓ Un'ottimizzazione dei condotti di aspirazione e della camera di combustione, per controllare i moti turbolenti dell'aria nel cilindro e favorirne un rapido rimescolamento con il combustibile.
- ✓ Utilizzo di un sistema di iniezione ad elevata pressione di iniezione (fino a 180 MPa) a controllo elettronico (l'odierno sistema Common-Rail (CR)), uso di iniettori multifori di diametro molto piccoli e volume "sac" ridotto al minimo.

I vantaggi legati a questi interventi di tipo esclusivamente motoristici sono rappresentati dalla loro semplicità ed affidabilità anche se comportano, per contro, spesso una penalizzazione intermini di prestazioni e difficoltà di riuscire a scendere sotto i limiti delle incalzanti normative sulle emissioni da veicoli (EURO5, EURO 6).

A tal proposito ci si è orientati anche verso interventi *a valle* che prevedono il filtraggio dei gas di scarico attraverso trappole o il loro trattamento attraverso marmitte catalitiche.

Risolvere, quindi il compromesso "prestazioni - consumi - emissioni", con una opportuna tecnologia, è una sfida complessa.

Questa necessità ha indotto l'industria motoristica a modificare l'assetto originario del motore a c.i., introducendo notevoli miglioramenti tecnici. Alcune fra le strade percorse sono state: **il miglioramento del controllo del sistema di iniezione** e lo sviluppo del sistema di distribuzione del motore.

Appare evidente, pertanto, come un'approfondita conoscenza della struttura e dell'evoluzione dei getti di combustibile (*spray*) e della loro interazione con il campo di moto dell'aria e con superfici solide, possa fornire utili indicazioni in merito all'ottimizzazione del processo di introduzione del combustibile nel cilindro. Per cui lo studio dei parametri che determinano la struttura e l'evoluzione sia spaziale che temporale dello *spray* è di notevole interesse, considerando che solo una perfetta iniezione può garantire una corretta combustione all'interno del cilindro, ed attualmente coinvolge la maggior parte dei centri di ricerca motoristici nonché molte delle più grandi aziende produttrici di motori e sistemi d'iniezione.

Proprio con l'obiettivo di approfondire il livello di conoscenze sul processo di iniezione nei motori ad accensione per compressione, è stata intrapresa un'attività di ricerca presso il Laboratorio Spray dell'Istituto Motori – CNR di Napoli riguardante la caratterizzazione di elettroiniettori multiforo Common Rail EURO5 alimentati con gasolio e biodiesel (RME ed RME invecchiato).

Le attività rientrano in una ricerca più ampia che comprende tra l'altro lo studio degli effetti del *COKING* sull'elettroiniettore e produce conseguenze su combustione/emissioni nei motori diesel.

Il coking è un effetto rilevato sulla punta dell'iniettore operante in camera di combustione. Un deposito di film liquido si forma nei fori di efflusso dell'ugello a chiusura dell'iniettore. L'alta temperatura della successiva combustione produce una rapida evaporazione della frazione "leggera" di detto deposito mentre la frazione "pesante" vaporizza parzialmente e a tempi successivi. I depositi sulla punta dell'iniettore dovuti alla non completa evaporazione della frazione pesante durante la fase di combustione, sommati a quelli provenienti dai prodotti della combustione e del lubrificante, producono delle parziali ostruzioni dei fori con successive anomalie di comportamento dell'apparato di iniezione. Riduzioni delle sezioni di efflusso (o ostruzioni complete) producono variazioni nel fuel injection rate con immediati effetti sul processo di combustione e produzione di inquinanti.

Per perseguire l'intento sono programmate delle *prove a freddo (in bomba)* in sistemi quiescenti e *prove a caldo* tipicamente in motori sperimentali e/o commerciali.

Le prove in bomba riguardano essenzialmente:

- La determinazione delle leggi di iniezione e rilevazione del profilo di iniezione (fuel injection rate) per durata di energizzazione con misura di portata;
- La determinazione della dispersione spazio-temporale del combustibile con misure delle penetrazioni e degli angoli di cono dei getti alle diverse pressioni d'iniezione e contropressione in camera d'iniezione.

CAPITOLO I

IL SISTEMA DI INIEZIONE COMMON RAIL

I.1. Introduzione

I motori ad accensione per compressione bruciano un combustibile poco volatile. Questo impone l'iniezione di uno spray di combustibile direttamente in camera di combustione senza avere premiscelamento con l'aria come avviene nei motori ad accensione comandata.

Il combustibile iniettato ad alta velocità in camera di combustione si presenta inizialmente come una colonna liquida compatta e successivamente si polverizza in una moltitudine di gocce di piccole dimensioni che si allontanano reciprocamente facendo assumere al getto la forma di un cono. La miscela combustibile-comburente è il risultato di un complesso processo di interazione aria-spray regolato dalle caratteristiche dello spray, dai moti secondari e dall'intensità di turbolenza dell'aria e dalla rapidità con la quale il combustibile liquido evapora.

Il processo di combustione risultante è prevalentemente diffusivo e non dipende dal rapporto aria-combustibile globale ma da quello locale.

I motori Diesel lavorano, perciò, con eccesso d'aria e la regolazione della potenza è realizzata variando la portata di combustibile.

La pressione media effettiva dipende direttamente dalla massa di combustibile per ciclo ed è limitata superiormente da:

- ✓ limiti sulle emissioni inquinanti ai bassi regimi;
- ✓ massimi carichi meccanici ai regimi intermedi (prossimi al regime di massima coppia);
- ✓ massimi carichi termici agli alti regimi (prossimi al regime di massima potenza).

Considerando, inoltre, che la quantità di combustibile iniettata per ciclo è piccolissima (4-40 mm³ per ciclo per cilindro nei motori Diesel per autotrazione) e che la regolarità del processo di combustione è determinata dalle caratteristiche dello spray di combustibile, il compito del sistema di iniezione in un motore ad accensione per compressione è particolarmente complesso.

Il sistema di alimentazione del combustibile nei motori Diesel deve garantire quindi:

- ✓ Alta pressione di iniezione;

- ✓ La dosatura della quantità di combustibile adeguata al carico e al regime del motore;
- ✓ L'uniformità di alimentazione fra i vari cilindri;
- ✓ La fasatura del periodo di iniezione, cioè iniezione in corrispondenza dell'anticipo prefissato;
- ✓ Le caratteristiche dello spray tali da ottenere un processo di combustione regolare e basse emissioni inquinanti in tutto il campo di funzionamento del motore:
 - *Polverizzazione/atomizzazione* del combustibile in modo da aumentare la superficie di contatto con l'aria e garantire la miscelazione. Al crescere della pressione di iniezione e al diminuire del diametro del foro (mantenendo il rapporto lunghezza/diametro sul valore ottimale $(4\div 5)$) aumenta il grado di atomizzazione e la sua uniformità;
 - *Penetrazione* : Prendendo in considerazione una sola goccia, lo spazio percorso nell'angolo utile ai fini della combustione, ovverossia la penetrazione, aumenta al crescere della velocità iniziale e del suo diametro e diminuisce quando interagisce con aria a crescente densità. L'effetto della pressione d'iniezione risulta duplice e contrastante: un suo aumento comporta una crescente polverizzazione e quindi una diminuzione della penetrazione, mentre dall'altra fa accrescere la velocità iniziale. L'esperienza conferma che fra queste due influenze di tipo opposto prevale la seconda, per cui elevate pressioni di iniezione favoriscono anche la penetrazione del getto, specialmente nella fase iniziale del moto.
 - *Diffusione* del combustibile nella camera di combustione in modo da sfruttare tutta l'aria presente.

In un motore Diesel la fase di combustione è notevolmente più complessa rispetto ad un motore ad accensione comandata, poiché in quest'ultimo, il combustibile ha il tempo di polverizzare, vaporizzare e miscelarsi con l'aria durante tutta la fase di aspirazione e per buona parte della fase di compressione. La benzina è inoltre una sostanza fortemente volatile, e quindi ha un'elevata tendenza ad evaporare, per cui, allo scoccare della scintilla tra gli elettrodi della candela, la miscela che si avvia a bruciare è con tutta probabilità omogenea e ben distribuita all'interno della camera di combustione.

In un motore Diesel, viene compressa solo aria e l'iniezione del combustibile avviene alla fine della fase di compressione, con un certo anticipo rispetto al PMS (10° - 40°), tale da permettere lo svolgimento della combustione in un intorno angolare di quest'ultimo. Quindi, i tempi a disposizione del gasolio per poter polverizzare, vaporizzare e miscelarsi con l'aria sono ridotti, anche per la sua scarsa volatilità rispetto alla benzina. Per ovviare a tali problemi si utilizzano:

- iniezione a pressioni elevate;
- miscele magre.

Le pressioni di iniezione arrivano oggi anche a 1.800-2.000 bar. Tali valori sono necessari per vincere la contropressione in camera di combustione che può raggiungere, nei motori sovralimentati, valori di 140 – 150 bar, e conferire al gasolio elevata energia cinetica in modo che esso possa penetrare e distribuirsi in tutta la camera di combustione e, soprattutto, possa atomizzarsi in modo da miscelarsi efficacemente con l'aria.

Nonostante le elevate pressioni di iniezione e le ridotte sezioni di efflusso degli iniettori multiforo, per ottenere una buona miscelazione è necessario ricorrere a forti eccessi d'aria (indici d'aria $\lambda = 1,2\div 4,5$). Tale soluzione penalizza fortemente, a parità di cilindrata e numero di giri, il motore Diesel, in termini di potenza erogata, rispetto a quello a benzina che lavora con miscele stechiometriche.

I.2. Classificazione dei sistemi di iniezione

I diversi sistemi di iniezione sviluppati per i motori Diesel nel tempo, possono essere classificati come segue:

1. Sistema di iniezione con una pompa per cilindro che fornisce all'istante e per il tempo necessari la portata di combustibile richiesta all'iniettore corrispondente; in questo caso la pompa è responsabile della pressione di iniezione, della quantità di combustibile iniettata e della fasatura, mentre gli iniettori, ad apertura automatica, sono responsabili delle caratteristiche dello spray;
2. Sistema di iniezione con pompa singola e distributore in cui un'unica pompa fornisce il combustibile con pressione e portata adeguate a tutti gli iniettori ad apertura automatica e un distributore apre il collegamento fra la mandata della pompa e l'iniettore che deve aprire, occupandosi in parte della fasatura;
3. Sistema di iniezione con accumulatore di pressione in cui un'unica pompa di alimentazione fornisce continuamente combustibile in pressione ad un accumulatore da cui si dipartono i collegamenti con gli iniettori ad apertura comandata; l'accumulatore ha la funzione di smorzare le oscillazioni di pressione, gli iniettori sono responsabili della quantità di combustibile iniettata, della fasatura e delle caratteristiche dello spray e la pompa fornisce soltanto la pressione di iniezione adeguata; possono rientrare in questa classe anche i sistemi con accumulo a bassa pressione e con iniettori-pompa, in cui cioè gran parte della pressione di iniezione è ottenuta attraverso un pompante posto in corrispondenza dell'iniettore o attraverso lo spillo dell'iniettore stesso;

4. Sistema di iniezione con accumulatore e distributore la cui unica differenza con il precedente è la presenza di un distributore a valle dell'accumulatore che apre i collegamenti con i vari iniettori ad apertura automatica all'istante e per il tempo desiderati.

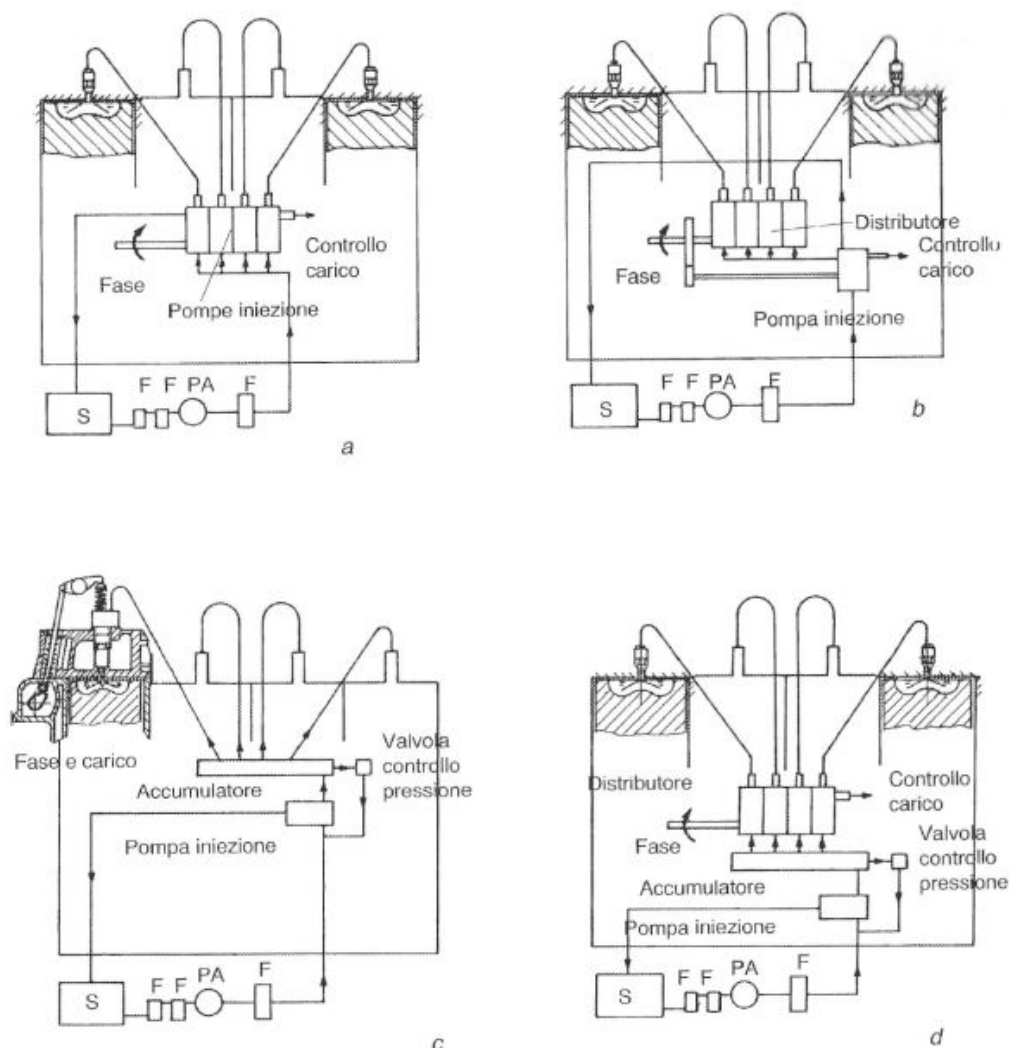


Fig. I.1: Schemi di sistemi d'iniezione adottabili su di un motore Diesel 4 cilindri: a) pompa d'iniezione per ciascun cilindro, riunite in una sola unità; b) pompa singola con distributore; c) accumulatore di pressione ed iniettori ad apertura comandata; d) accumulatore di pressione e distributore. In tutti i casi il gruppo di iniezione è alimentato da una pompa PA che aspira il combustibile dal serbatoio S e lo forza ad attraversare una serie di filtri F.

In passato i motori Diesel erano tutti equipaggiati con sistemi di iniezione meccanica, quale il sistema 1 anzidetto, rappresentato in Fig.I.1.a: Sistema di iniezione con pompa in linea con un numero di pompanti alternativi con pistone rotante pari al numero dei cilindri.

Nei motori più piccoli si adottava il sistema 2 (Fig.I.1.b): pompa con distributore incorporato in cui un unico pompante alternativo fornisce la pressione di iniezione e la portata di combustibile e la distribuzione del combustibile fra i vari iniettori è realizzata con un moto rotatorio del pompante stesso.

Successivamente il controllo elettronico è stato adottato per i sistemi di iniezione suddetti con un miglioramento sensibile soprattutto in termini di accuratezza dei parametri di iniezione.

I.3. Il Sistema Common Rail

Il sistema di iniezione a controllo elettronico per motori Diesel ad iniezione diretta di tipo *common-rail*, nasce come progetto strategico di medio termine nell'ambito del Gruppo Fiat verso la metà degli anni '80. Sviluppato dall'Elasis (Sistema Ricerca Fiat nel Mezzogiorno – Sede di Bari) prima e da Magneti Marelli e CRF (Centro Ricerche Fiat – Orbassano, Torino) successivamente, ha raggiunto la fase di pre-industrializzazione intorno al 1993. Il progetto è stato quindi ceduto al Gruppo Bosch nel 1994, che ne ha curato lo sviluppo finale e la fase di industrializzazione vera e propria. La prima vettura equipaggiata (Alfa Romeo 156) con questo innovativo sistema di iniezione è stata commercializzata a partire dalla fine del 1997.

Questo sistema di iniezione, il primo nel suo genere e probabilmente ancora il punto di riferimento tecnico del settore, ha costituito un punto di svolta storico nell'evoluzione del motore Diesel. Infatti, grazie all'adozione di questa tipologia di sistema di iniezione, soprattutto in virtù del controllo elettronico di tutti i principali parametri operativi, il motore Diesel ha visto contemporaneamente crescere la sua potenza specifica (sono stati raggiunti 70 CV/dm³, valore ottimo anche per un motore ad accensione comandata) conservando e anzi migliorando il suo livello di efficienza energetica (prossima al 40% in condizioni di coppia massima). Aspetto tutt'altro che secondario, la flessibilità del sistema di iniezione ha aumentato enormemente le possibilità di controllo delle emissioni inquinanti rispetto a quanto possibile con sistemi convenzionali.

Successivamente alla commercializzazione del sistema *Common-Rail* Bosch (con la designazione *Unijet* per la prima generazione, attualmente denominato *MultiJet*), diversi altri sistemi simili in termini concettuali sono stati sviluppati o sono in corso di sviluppo da parte di Aziende concorrenti (Delphi, Siemens, Denso, la stessa Magneti Marelli). Altri Costruttori hanno scelto via alternative (sistema iniettore –pompa Volkswagen) per ottenere risultati analoghi in termini di flessibilità e caratteristiche di iniezione. Tuttavia, nel seguito, si farà riferimento al sistema Bosch ritenendolo indicativo dello stato dell'arte.

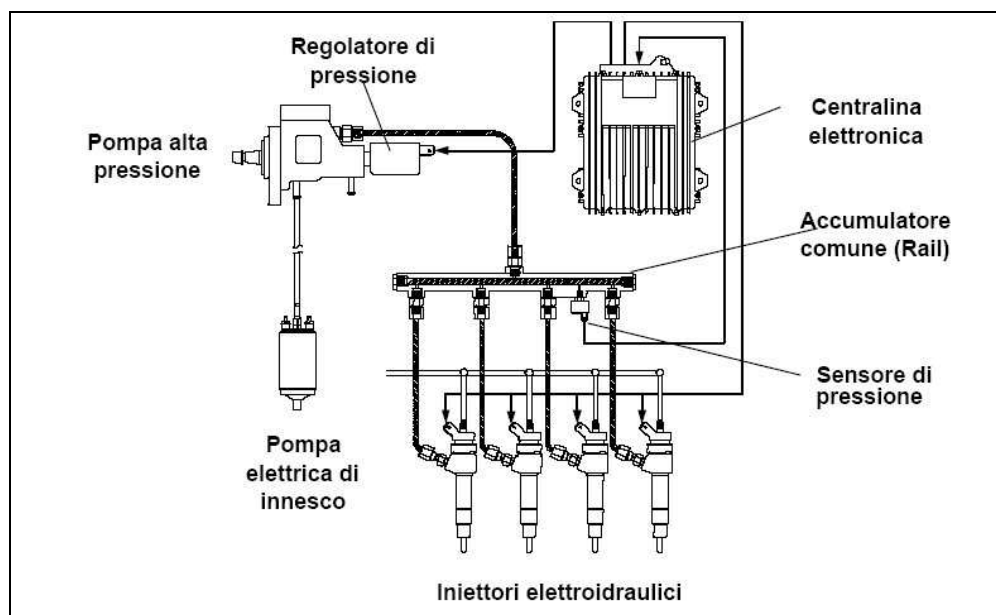


Fig. I.2: Schema di un sistema di iniezione Common Rail

I.4. Il Sistema Bosch Common-Rail Unijet-Multijet

Con questa tipologia di sistema di iniezione, la gestione elettronica garantisce un controllo estremamente preciso e flessibile delle quantità iniettate, dei tempi di iniezione e della pressione di iniezione. Il controllo della quantità iniettata può essere eseguito in maniera singola per i diversi cilindri ad ogni ciclo del motore. E' inoltre possibile realizzare iniezioni multiple (attualmente fino a 5: pilot, main (scomposta a sua volta in pre-principale-post), post-iniezione) nell'ambito dello stesso ciclo motore, ottenendo significativi vantaggi in termini di controllo del processo di combustione. Con ciò si ottiene una significativa riduzione delle emissioni inquinanti, dei consumi ed un miglioramento delle prestazioni, diminuzione di rumorosità e vibrazioni dell'unità motrice.

Il sistema può operare con velocità di rotazione del motore comprese tra $100 \div 6000$ giri al minuto, con pressione di iniezione regolabile tra $150 \div 1800$ bar (pressione raggiunta anche da altri sistemi concorrenti (Delphi)), indipendentemente dalla velocità di rotazione del motore. Complessivamente, il sistema UNIJET può essere visto come il primo impianto di iniezione per motori Diesel operante secondo criteri logici di controllo del motore simili a quelli ormai ampiamente affermati nel campo dei motori ad accensione comandata. Infatti, le modalità di iniezione (in termini di quantità, *timing* e pressione) sono in questo caso determinate in base, oltre che al carico richiesto e alla mappatura di funzionamento precodificata, all'effettivo stato operativo del motore, definito, come sarà più chiaro nel seguito, grazie all'adozione di uno specifico apparato sensoristico.

Il componente che rende possibile tale autonomia è l'accumulatore ad alta pressione *rail*; l'apertura degli iniettori viene comandata elettricamente tramite solenoide, con la possibilità di realizzare iniezioni multiple (pilot, main, post-iniezione).

I motori Diesel CR competono, in termini di prestazioni, con quelli ad accensione comandata, garantendo nel contempo consumi specifici nettamente inferiori.

L'introduzione del sistema Common Rail consente, quindi:

- ✓ Completa flessibilità della gestione della pressione di iniezione, indipendentemente dal regime del motore e dal carico, per esempio è possibile ottenere pressioni elevate, maggiori di 1000 bar, ai medi e bassi regimi (< di 1500 giri/min);
- ✓ Completa flessibilità nella gestione della temporizzazione di ciascuna parte dell'iniezione;
- ✓ Elevata precisione nel controllo della quantità iniettata, anche colpo a colpo, quando necessario (per esempio in condizioni di transitorio);
- ✓ Capacità di operare a velocità di rotazione del motore elevate (fino a 6000 giri/min);
- ✓ Possibilità di controllare elettronicamente i principali parametri di iniezione, ottimizzando così il funzionamento del motore, senza dover ricorrere a sistemi complessi.

I.5. Principio di funzionamento del Sistema Unijet

Il sistema UNIJET è costituito dai seguenti componenti fondamentali (Fig.I.1):

- ✓ un circuito idraulico di alta pressione costituito dalla pompa di alta pressione, dall'accumulatore comune, dagli elettroiniettori e dai vari condotti;
- ✓ un circuito idraulico di bassa pressione costituito da un elettropompa, da più stadi di filtraggio e dai vari condotti di mandata e di ritorno;
- ✓ una centralina elettronica.

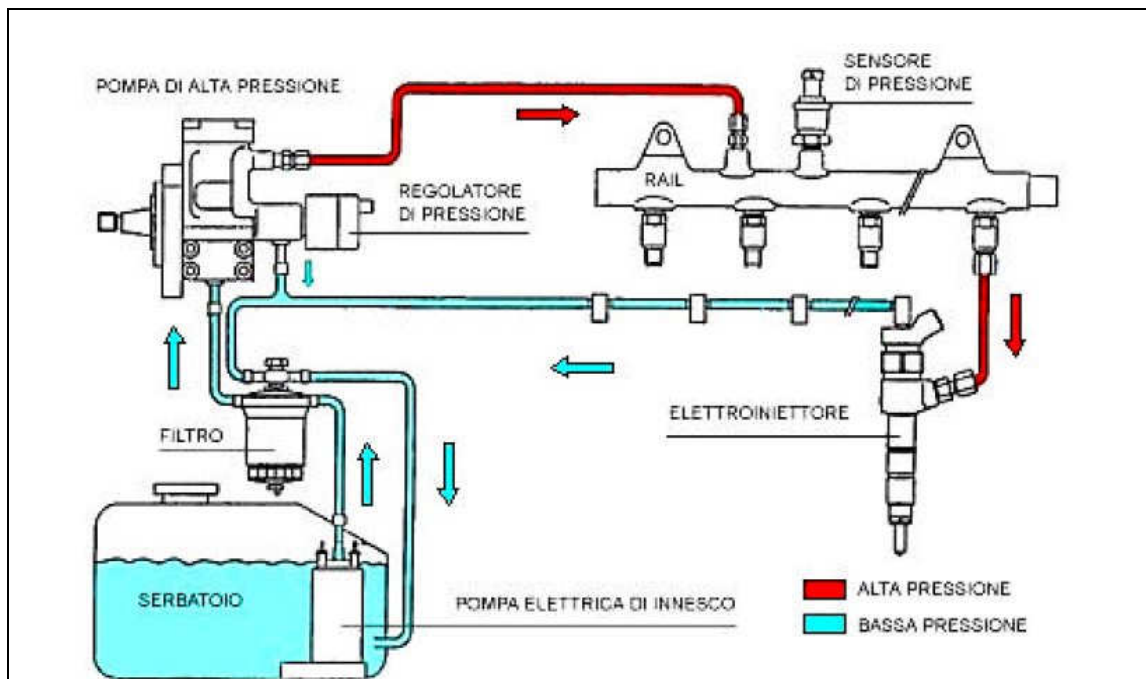


Fig. I.3: Circuiti di alta e bassa pressione.

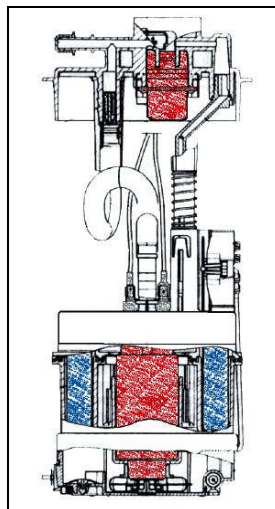


Fig. I.4: Elettropompa di innesco.

Facendo riferimento al sistema CR Bosch, un'elettropompa da 12 V (Fig.I.4), immersa nel serbatoio fornisce al combustibile una prevalenza di circa 0,5 bar necessaria ad inviarlo alla pompa di alta pressione. La portata fornita è leggermente superiore a quella massima della pompa ad alta pressione (eccesso di almeno 0,5 l/min), per cui è previsto un sistema di ricircolo dell'eccesso al serbatoio (Fig.I.3). L'elettropompa è alloggiata in un cestello a cui è annesso anche il galleggiante del livello carburante.

Il combustibile, inoltre, è soggetto ad una serie di stadi di filtraggio per eliminare le particelle solide in sospensione e l'acqua di condensa presente nel serbatoio. Il filtro è di solito del tipo a cartuccia con elemento filtrante costituito da una serie di dischi in carta, ad alto potere filtrante, ed è inserito tra la pompa di alimentazione e quella rotativa, che effettua l'iniezione. Nelle soluzioni più recenti, il filtro è dotato di un sensore di rilevazione per la presenza dell'acqua. In alcuni casi, una resistenza elettrica avvolge uno dei filtri con lo scopo di preriscaldare il gasolio, per migliorare l'avviamento a freddo ed evitare possibili congelamenti.

La pompa di alta pressione, rappresentata in sezione nelle figure I.5 e I.6, è costituita da tre pompanti radiali, disposti a 120° l'uno dall'altro (da cui il nome Radialjet), che ruotano sul piano contenente gli assi dei pompanti. Essa fornisce continuamente combustibile, alla pressione desiderata, all'accumulatore. La pompa è trascinata dalla cinghia di distribuzione, senza obblighi di fasatura col motore, ad una velocità di rotazione pari alla quella dell'albero motore nei motori due tempi, pari alla metà nei motori quattro tempi. Ogni gruppo pompante è composto da un sistema pistone-cilindro. Un eccentrico di forma triangolare, solidale all'albero della pompa, determina, con la sua rotazione, il movimento in successione dei tre pistoni, mediante lo spostamento di una interfaccia meccanica (punteria), frapposta tra esso ed il piede dello stantuffo. Il contatto tra l'eccentrico ed ogni singola punteria viene assicurato mediante una molla. Ogni gruppo pompante è dotato di una valvola di aspirazione a piattello e di una di mandata a sfera. Il combustibile viene inviato al collettore comune per mezzo di un unico condotto.

Il raffreddamento e la lubrificazione della pompa vengono realizzati sfruttando il ricircolo del gasolio in eccesso, che viene rinviato al serbatoio a pressione atmosferica.

Un'elettrovalvola permette la regolazione della pressione, controllando il grado di apertura della sezione del condotto di riflusso. Essa è costituita da un otturatore sferico, mantenuto nella sua sede dall'azione di una molla di precarico tale da permettere il funzionamento alla minima pressione, lasciando scoperta una ridotta luce di passaggio. Un solenoide esercita una forza, variabile in funzione della corrente che lo eccita, opposta all'azione della molla di chiusura, permettendo la variazione della sezione del condotto di ricircolo, e quindi della pressione dal minimo ad un valore massimo, che risulta così indipendente dal regime di rotazione.

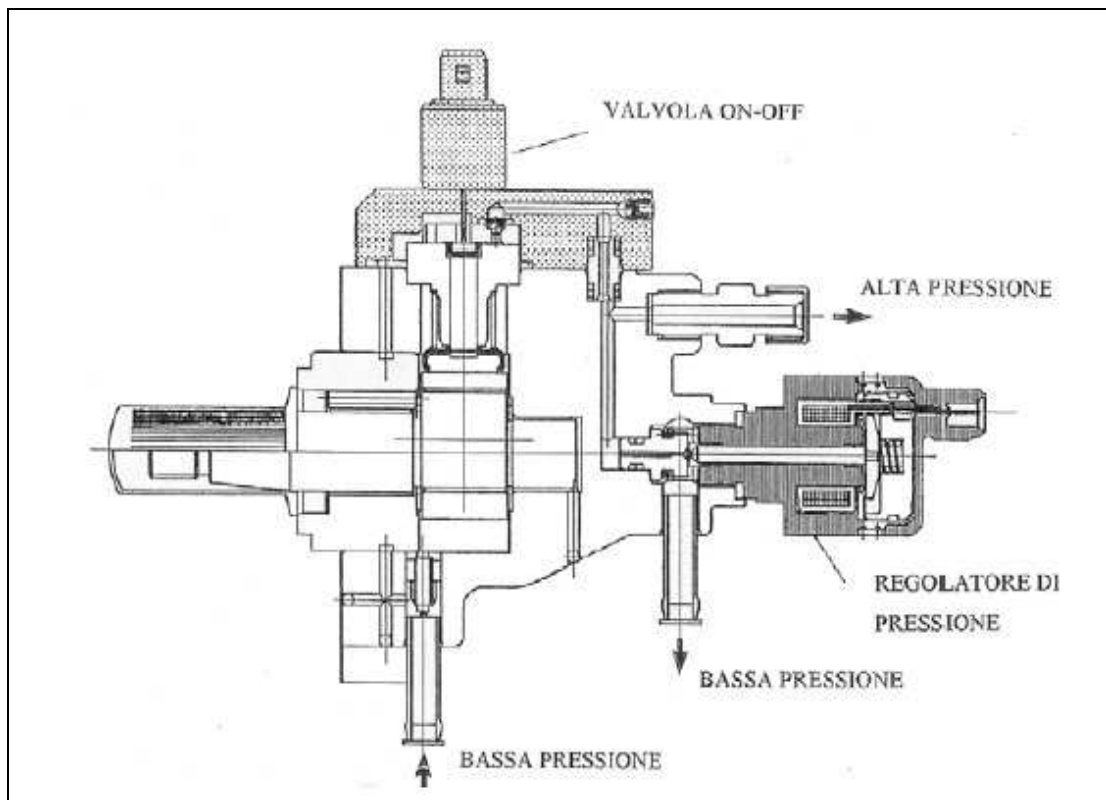


Fig. I.5: Sezione longitudinale di una pompa di alta pressione Radialjet.

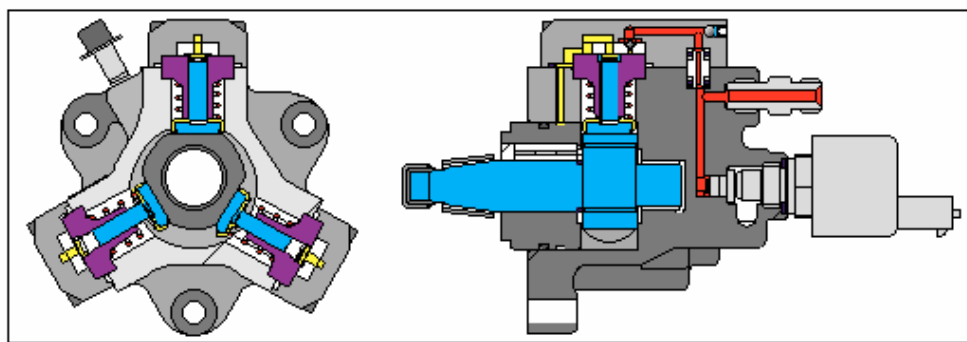


Fig. I.6: Sezione trasversale di una pompa di alta pressione Radialjet.

Il valore della pressione, misurato da un sensore sull'accumulatore, viene comparato con quello previsto in sede di progetto e memorizzato dalla centralina elettronica. Se essi differiscono, allora viene aperto o chiuso un foro di troppo pieno nel regolatore della pompa di alta pressione.

La pompa Radialjet è inoltre dotata di una valvola elettromagnetica di tipo on-off, installata sulla mandata di uno degli elementi pompanti, che permette di disattivare lo stesso elemento pompante

durante le condizioni di funzionamento per le quali sia richiesta una portata di combustibile inferiore ai $2/3$ della massima, in modo da limitare l'assorbimento.

L'accumulatore comune (*Common Rail*), rappresentato in Fig. I.7, ha la funzione di smorzare le oscillazioni di pressione, dovute all'alimentazione pulsante della pompa di alta pressione e alle aperture intermittenti dei vari iniettori. Il *Rail* è costruito in acciaio ed ha la forma di un parallelepipedo, con una cavità interna di forma cilindrica; viene fissato al motore tramite opportuni fori passanti. Il suo volume (40 cm^3 circa per un motore 4 cilindri - 2000 cm^3 di cilindrata), risulta dal compromesso di avere piccole oscillazioni di pressione e rapide risposte alla variazione della pressione di iniezione. Il rail è equipaggiato con il già citato sensore di pressione e, in alcuni casi, con un sensore di temperatura necessario per calcolare la densità del combustibile.

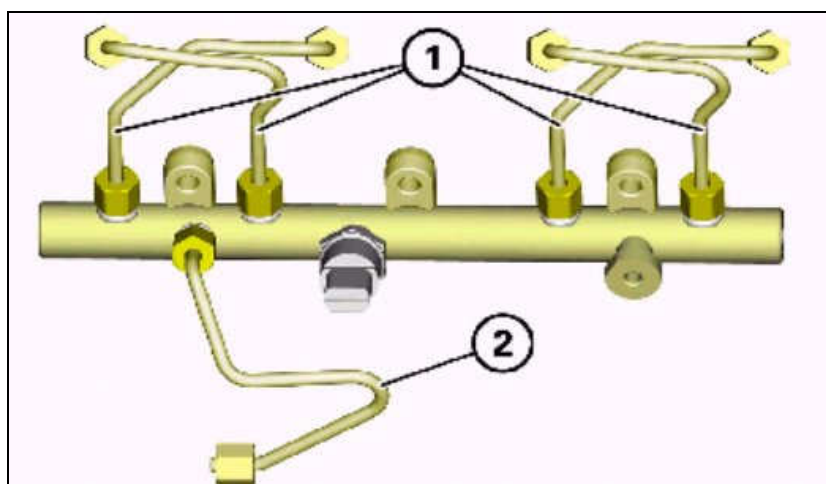


Fig I.7: *Common Rail* (1. condotti verso gli elettroiniettori; 2. condotto dalla pompa di alta pressione).

Gli elettroiniettori (Fig.I.8) sono comandati da un veloce attuatore elettromagnetico a solenoide (integrato nel corpo di ognuno di essi). Gli elementi fondamentali di un elettroiniettore sono:

- ✓ il polverizzatore multiforo (Fig.I.9.a), di tipo VCO (Valve Covered Orifice), con i fori otturati direttamente dallo spillo, o di tipo Mini-Sac (Fig.I.9.b), in cui i fori sono alimentati da un piccolo volume, a valle della zona di tenuta, tra lo spillo e la sua sede; lo spillo è tenuto in posizione chiusa, a riposo, da una molla;
- ✓ l'asta di pressione, il cui moto è controllato dalla pressione esistente nel piccolo volume di controllo, posto sulla sua parte superiore; la legge di variazione della pressione nel volume di controllo è determinata dai due fori calibrati A e Z, che regolano l'afflusso e il deflusso di combustibile;

- ✓ l'elettrovalvola, posta nella parte superiore dell'iniettore, che ha la funzione di scoprire il foro A, per realizzare l'iniezione.

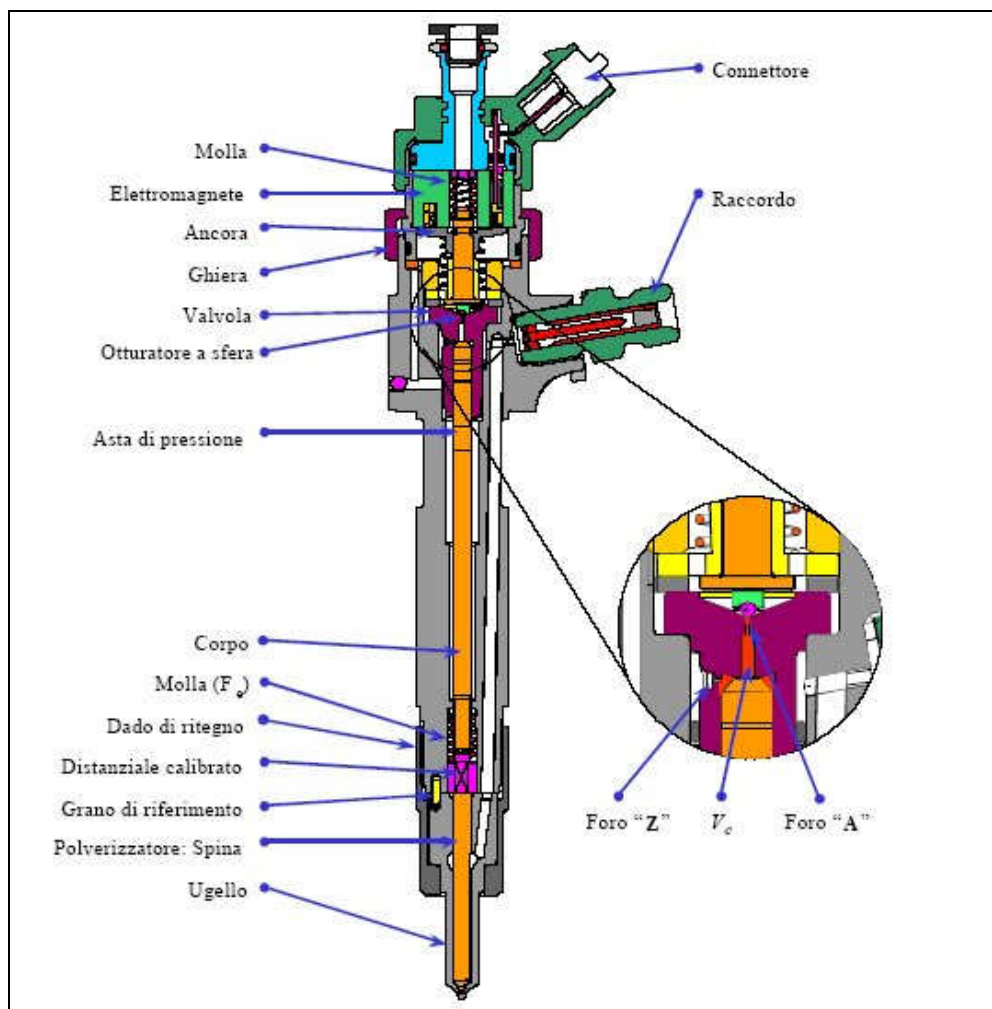


Fig. I.8: Elettroiniettore.

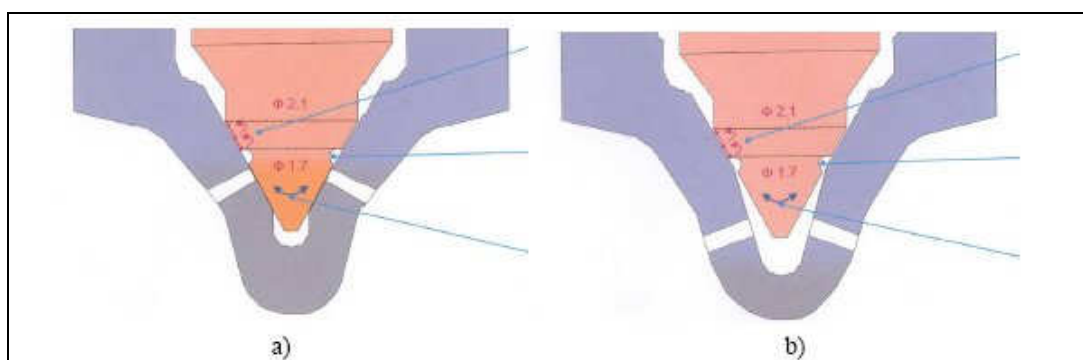


Fig. I.9: Confronto fra iniettore VCO (a) e Mini-sac (b)

Un unico condotto ad alta pressione arriva all'iniettore e si divide al suo interno in due parti, di cui una destinata all'alimentazione del polverizzatore, l'altra al volume di controllo dell'asta di pressione. Entrambe contribuiscono alla lubrificazione degli organi in movimento dell'elettroiniettore, grazie ai consistenti trafilamenti presenti in un sistema di iniezione operante a così elevate pressioni di esercizio. Il volume di controllo è collegato ad un circuito di ritorno, con una luce occlusa da un otturatore, comandato elettronicamente da un solenoide.

Quando il solenoide è eccitato l'otturatore apre la luce di ritorno che, essendo di sezione maggiore di quella di mandata, tende a svuotare il volume di controllo e a diminuire la pressione.

Quindi si hanno le seguenti condizioni di funzionamento:

- ✓ solenoide a riposo e spillo chiuso, per effetto della forza di precarico della molla che collega lo spillo alla testa dell'iniettore (Fig. I.10);
- ✓ solenoide eccitato e apertura della luce di ritorno; in questo caso la pressione nel polverizzatore è maggiore di quella nel volume di controllo e la forza di pressione, che tende ad alzare lo spillo, è maggiore della forza di precarico della molla; lo spillo si apre e il combustibile entra nel cilindro (Fig. I.11).

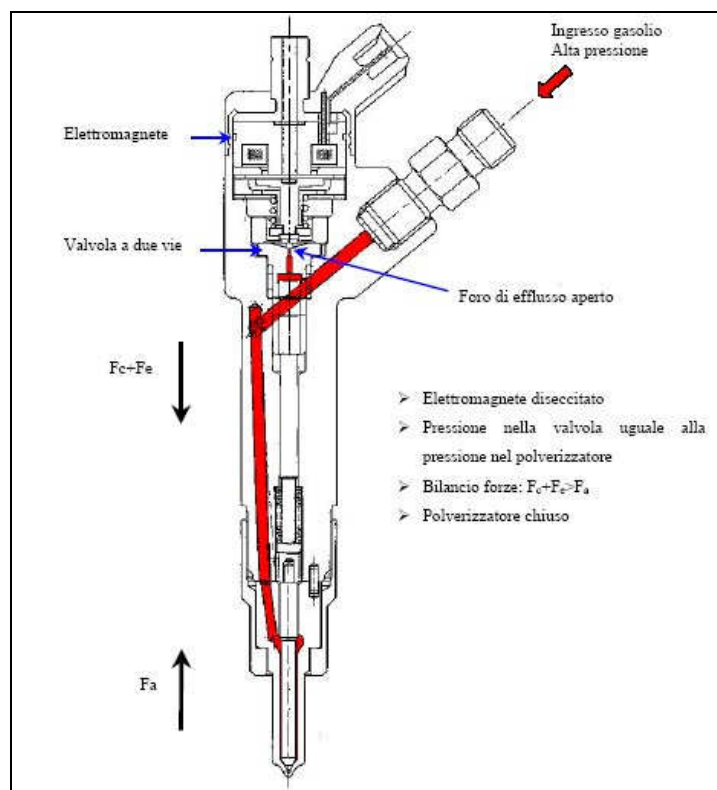


Figura I.10: Condizione di riposo dell'elettroiniettore.

Ogni iniezione è identificata da due parametri:

- ✓ l'istante in cui la centralina invia il comando di alzata dello spillo, generalmente denominato SOI (Start Of Injection);
- ✓ la durata temporale del comando di iniezione, generalmente denominata ET (Energizing Time o tempo di eccitazione del solenoide).

C'è un certo tempo di ritardo tra il comando e l'effettiva apertura dell'iniettore, e anche la durata dell'iniezione è diversa dal tempo di eccitazione del solenoide. Dato che ritardo e durata effettiva variano in maniera complessa al variare delle condizioni di funzionamento del motore, il sistema richiede un'accurata fase di calibrazione prima dell'installazione (Fig.I.12).

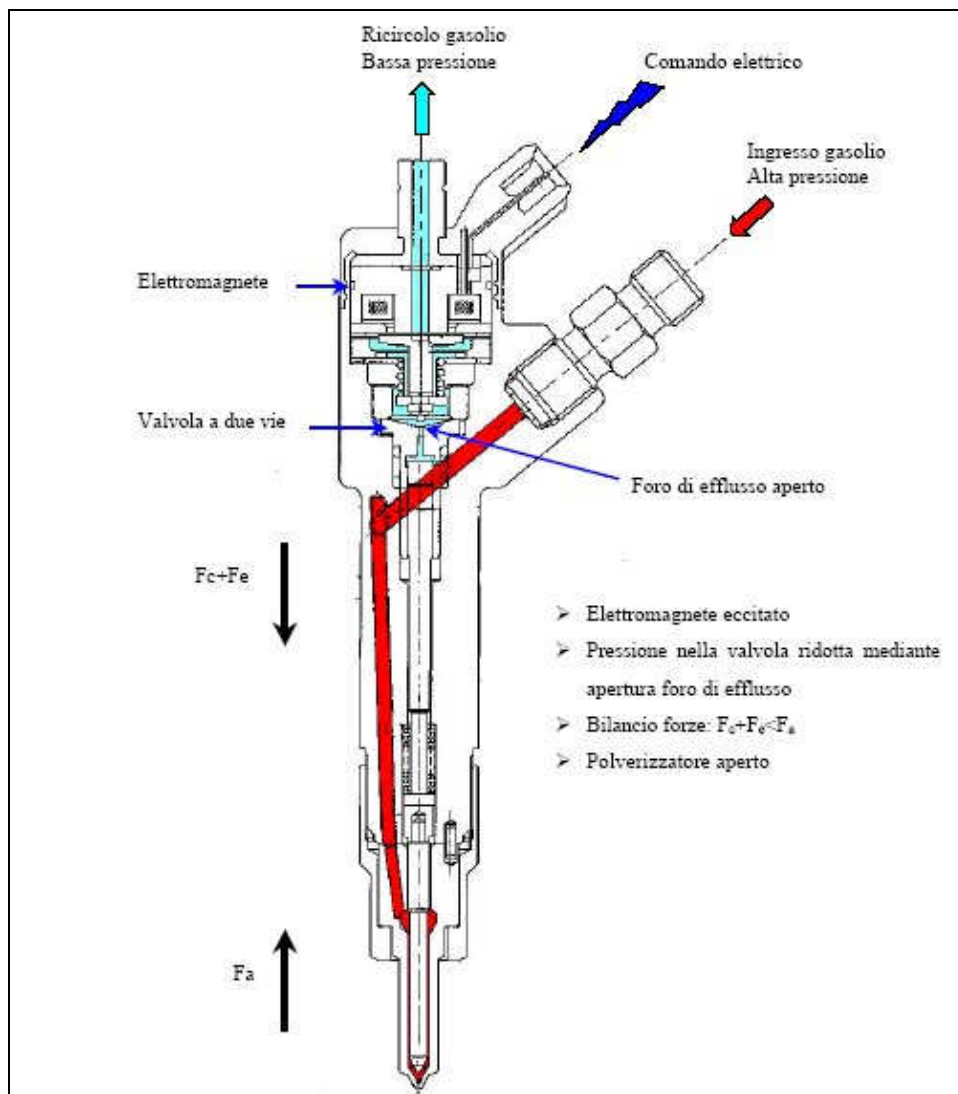


Fig. I.11: Condizione di funzionamento dell'elettroiniettore.

La sequenza dei diversi ritardi meccanici ed elettrici è illustrata in figura I.13. Ai capi della bobina dell'elettrovalvola viene applicata una corrente, che viene mantenuta per un tempo ET (Energizing Time), dipendente dalla quantità di combustibile che si desidera iniettare e dalla pressione di alimentazione. Il moto dell'ago pilota dell'elettrovalvola ha inizio, con un certo ritardo TRE (Tempo Ritardo Eccitazione), ed il volume di controllo comincia a svuotarsi. L'ago pilota raggiunge la battuta superiore dopo un tempo TRAA (Tempo di Ritardo Apertura Ago pilota), dipendente dall'alzata massima, regolabile mediante un'apposita vite di registro.

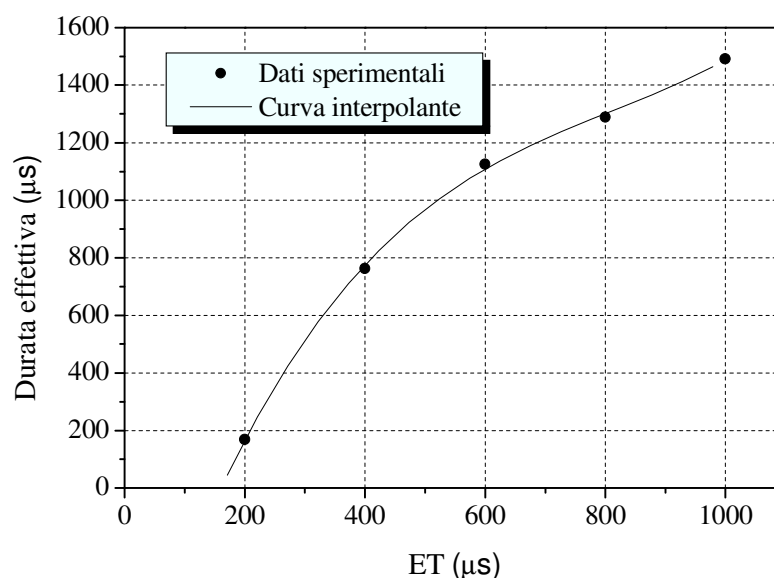


Fig. I.12: Durata effettiva di iniezione in funzione della durata temporale del comando di iniezione (Unijet)

Trascorso un tempo TRAS (Tempo di Ritardo Apertura Spillo) dall'inizio del moto dell'ago pilota, il complesso asta di pressione-spina inizia il suo moto e contemporaneamente comincia l'iniezione; il tempo trascorso tra l'inizio dell'eccitazione dell'elettromagnete e l'inizio dell'iniezione viene detto TRII (Tempo di Ritardo Inizio Iniezione). Quando cessa il comando all'elettromagnete, l'ago pilota comincia la sua corsa di discesa, che termina dopo un tempo TRCA (Tempo di Ritardo Chiusura Ago pilota), dipendente anch'esso dall'alzata massima consentita; il foro A viene otturato ed il volume di controllo si riempie nuovamente.

Si possono individuare quindi i seguenti tempi:

- ✓ TRCS (Tempo di Ritardo Chiusura Spillo), pari al tempo intercorso tra la chiusura del foro A ed il termine dell'iniezione;
- ✓ TAS (Tempo di Apertura Spillo), pari alla durata effettiva dell'iniezione;

- ✓ TRFI (Tempo di Ritardo di Fine Iniezione), calcolato dalla fine del comando elettrico.
- ✓ Il sistema CR è dunque un impianto di iniezione per motori Diesel, operante secondo criteri logici di controllo del motore, in cui le modalità di iniezione (in termini di quantità, timing e pressione) sono determinate in base, oltre che al carico richiesto e alla mappatura di funzionamento precodificata, all'effettivo stato operativo del motore, definito grazie all'adozione di un numero significativo di sensori.

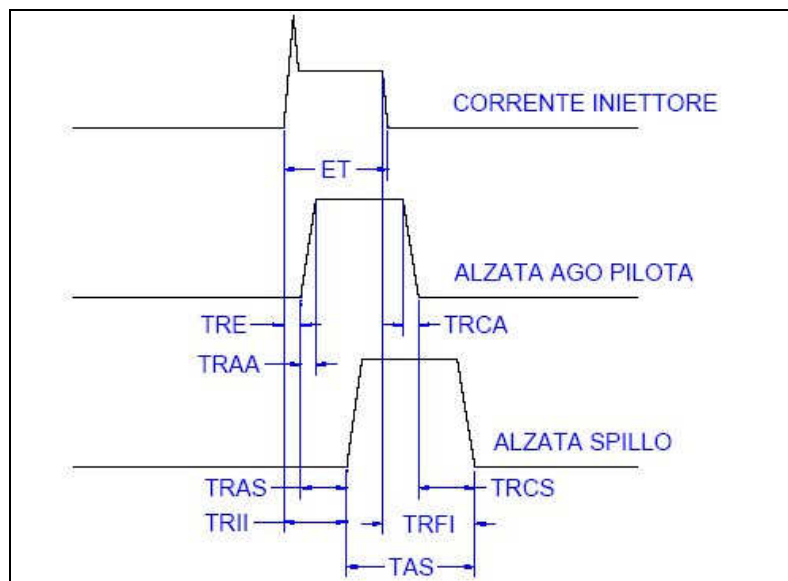


Fig. I.13: Ritardi tra il comando e la risposta di un elettroiniettore.

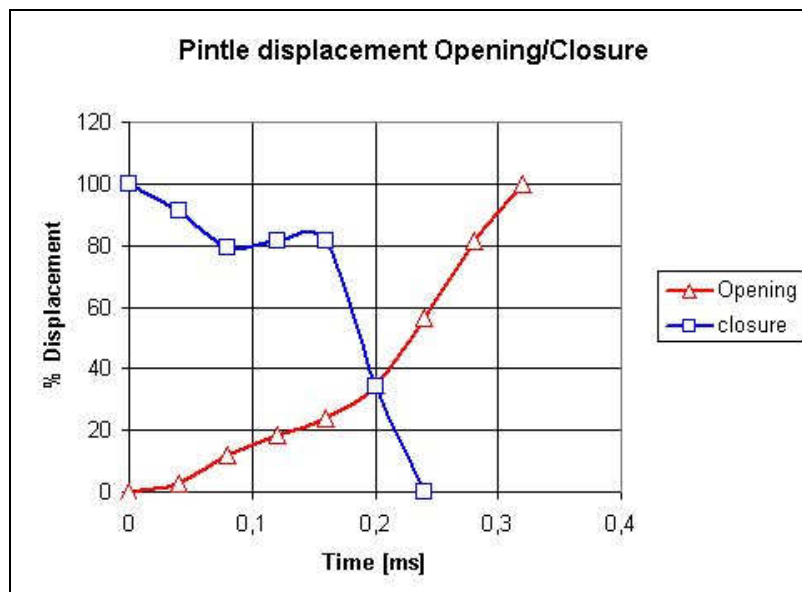


Fig. I.14: Scostamenti tra i comandi e l'effettiva apertura e chiusura dell'iniettore.

Si comprende quindi il ruolo fondamentale ricoperto dalla centralina elettronica (Fig.I.15). Essa è composta da:

- ✓ un'unità di potenza (EPU = Electronic Power Unit), che si occupa della generazione dei segnali di apertura degli elettroiniettori;
- ✓ un'unità logica (ECU = Electroni Control Unit), che riceve i segnali dai vari sensori di misura, montati nel motore, e provvede al controllo dei parametri di iniezione in base ai diversi parametri operativi misurati.

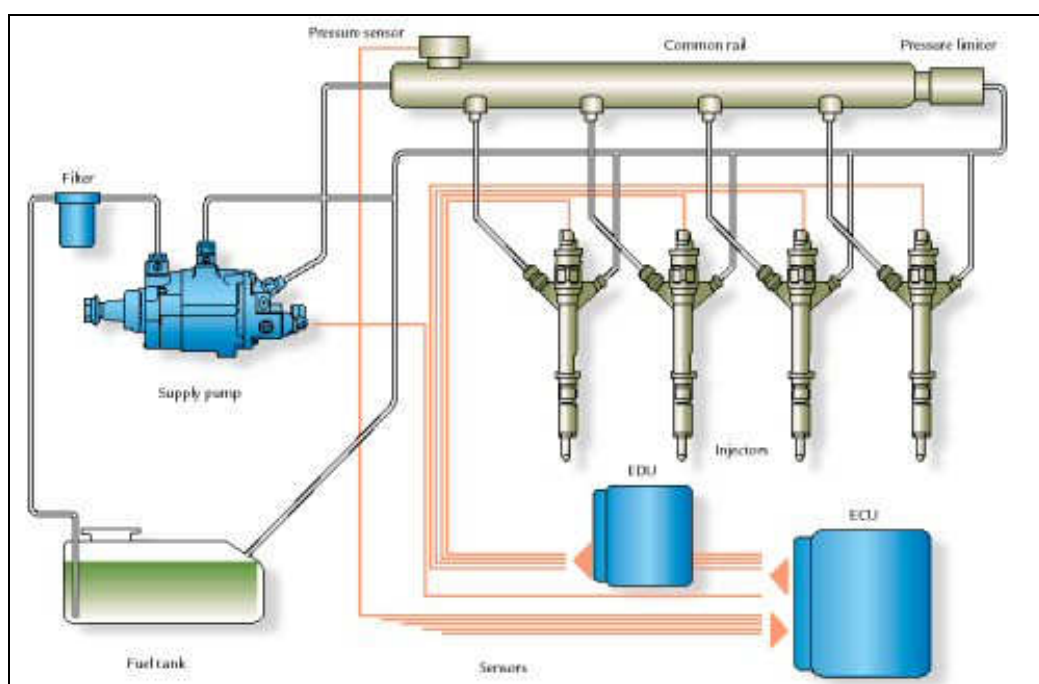


Fig. I.15: Sistema di iniezione con segnali da e verso la centralina elettronica.

I sensori che comunicano con la centralina sono generalmente:

- ✓ Sensore di giri, un trasduttore a riluttanza magnetica (pick-up) posizionato di fronte alla ruota fonica, calettata sull'albero motore; il sensore invia alla centralina un segnale ogni 6° di rotazione dell'angolo di manovella;
- ✓ Sensore di fase, costituito da un pick-up affacciato su di una ruota fonica montata sull'albero di distribuzione che consente la fasatura delle iniezioni con i cicli dei vari cilindri;
- ✓ Potenzimetro posizione dell'acceleratore, che rileva la posizione del pedale acceleratore per determinare la domanda di potenza richiesta dal guidatore; il sensore è composto da un potenziometro collegato al pedale tramite alcuni leveraggi; il segnale ricevuto dalla centralina viene

trattato opportunamente per convertire il valore di tensione in un valore espresso in gradi, da 0° (pedale completamente rilasciato) a 90° (pedale premuto a fondo);

- ✓ Sensore di temperatura del refrigerante, una resistenza variabile di tipo NTC (Negative Temperature Coefficient), installata sul termostato, e lambita dal liquido refrigerante del motore; esso fornisce alla centralina un indice dello stato termico del motore, al fine di determinare le correzioni di portata di combustibile, pressione di iniezione, anticipo all'iniezione (sia pilota che principale) ed EGR, durante l'avviamento a freddo e nelle fasi di riscaldamento del motore;
- ✓ Sensore pressione atmosferica (nella centralina);
- ✓ Sensore di velocità, sensore ad effetto Hall situato sul cambio; con il segnale ricavato, la centralina corregge la quantità di combustibile e l'anticipo d'iniezione, in relazione alle condizioni riscontrate; il segnale, in concomitanza con il sensore di pedale frizione, si usa anche per determinare la marcia con cui la vettura sta viaggiando;
- ✓ Interruttore del freno, utilizzato dalla centralina per riconoscere l'azione del conducente sul pedale del freno e come segnale di decelerazione del motore;
- ✓ Interruttore della frizione, la centralina riceve dal contattore frizione un segnale di pedale frizione premuto/non premuto e diminuisce la quantità di combustibile d'iniezione nel momento in cui viene premuto il pedale della frizione, durante i cambi di marcia; ciò favorisce un andamento più uniforme del veicolo ed evita lo scuotimento del motore;
- ✓ Sensore di sovrappressione, posizionato nel collettore di aspirazione e usato dalla centralina elettronica per regolare la pressione e la durata dell'iniezione;
- ✓ Misuratore di portata d'aria aspirata, utilizzato nelle strategie per la limitazione della fumosità durante i transitori e per controllare l'EGR; il misuratore utilizzato è del tipo a filo caldo, ed è disposto a valle del filtro ed a monte del compressore;
- ✓ Sensore di temperatura dell'aria aspirata (interno al debimetro);
- ✓ Sensore di temperatura del combustibile;
- ✓ Sensore di pressione del combustibile;
- ✓ Se presente aria condizionata, innesto del compressore.

In base ai valori rilevati dai sensori, e utilizzando le mappature interne alla sua memoria, la centralina stabilisce le strategie di intervento e di correzione dei tempi base di iniezione, agendo sugli attuatori.

I.5. Sistema di iniezioni multiple: Multijet.

La centralina elettronica, denominata MULTIJET, permette una gestione ancora più flessibile delle modalità di comando dell'iniezione, aumentando il numero di iniezioni effettuabili nell'ambito di un ciclo motore rispetto al sistema precedentemente in produzione, denominato UNIJET.

Le diverse iniezioni, che la nuova generazione del sistema Common Rail consente di attuare, sono le seguenti:

- ✓ iniezione pilota; effettuata con elevato anticipo rispetto all'iniezione principale, permette di ridurre drasticamente il rumore di combustione, migliora l'avviamento a freddo e produce un incremento della coppia ai bassi regimi a scapito di un certo peggioramento del particolato;
- ✓ pre-iniezione; effettuata con bassissimi valori di anticipo rispetto all'iniezione principale, permette, insieme all'iniezione After, di modulare l'andamento della combustione contenendo le emissioni di inquinanti;
- ✓ iniezione main; iniezione principale la cui durata può essere gestita indipendentemente dalla pressione di iniezione;
- ✓ iniezione after; con questo termine si indica un'iniezione effettuata subito dopo l'iniezione principale, con analoghe finalità della pre-iniezione
- ✓ post-iniezione; ulteriore iniezione effettuata nelle ultime fasi della combustione allo scopo di aumentare le temperature di scarico, permettendo (periodicamente) la rigenerazione della trappola per il particolato. La post-iniezione può inoltre creare un ambiente riducente necessario per la rigenerazione del catalizzatore DeNO_x per l'abbattimento degli ossidi di azoto.

Le iniezioni multiple (Multijet) rappresentano una forte evoluzione tecnologica del sistema Unijet Common Rail, che gestisce una piccola iniezione (Pilot), attuata alcuni millisecondi prima dell'iniezione principale (Main) ed eventualmente una iniezione ritardata (Post), utile per l'attivazione dei sistemi di post-trattamento dei gas (DeNO_x - DPF). Questa combinazione di iniezioni garantisce un apprezzabile riduzione del rumore di combustione e consente un notevole miglioramento degli avviamenti a freddo, ma produce un certo aumento del particolato, accettabile per rispettare i limiti imposti dalle emissioni EURO 3, ma insufficiente per rientrare nelle normative EURO 4.

A tal riguardo, gli studi compiuti da Nehmer e Reitz hanno dimostrato che una iniezione principale "main", preceduta da una iniezione "pilot", consente una drastica riduzione degli NO_x con un minimo aumento dei soot, rispetto ad una unica iniezione della stessa durata complessiva.

Una terza iniezione, posta a valle della “main”, ossia una “post injection”, garantisce una riduzione tanto degli NO_x quanto dei soot, sia a bassi che ad alti carichi.

Potendo, quindi, suddividere l’iniezione principale in due, tre o quattro iniezioni più piccole, si riescono a raggiungere ulteriori traguardi nella riduzione delle emissioni, nel controllo del rumore di combustione e nell’incremento delle prestazioni.

In un primo tempo i ricercatori hanno steso una mappa dei benefici che si ottengono incrociando una certa sequenza di iniezioni multiple (due secondarie molto vicine alla principale; una secondaria non troppo vicina alla principale più altre due secondarie ravvicinate; una secondaria e poi, ad una certa distanza, due principali vicine tra loro e così via) nei diversi campi di funzionamento del motore: nella zona del minimo, con carichi e regime di rotazione bassi, ad alto numero di giri e con un carico medio, a basso numero di giri e con un carico elevato e così via.

Questo studio, ha fatto emergere le potenzialità del sistema, che fornisce sempre grandi vantaggi, accentuati, in un campo o nell’altro, in funzione del tipo di sequenza scelta e dell’area di funzionamento del motore nella quale questa viene applicata. In alcuni casi, infatti, si privilegia la riduzione dei tempi di avviamento e della fumosità, in altri l’incremento della coppia e l’abbattimento del rumore, in altri ancora la riduzione delle emissioni e l’incremento della silenziosità.

Il nuovo sistema di iniezione (Multijet) sfrutta il controllo elettronico degli iniettori per eseguire, durante ogni ciclo motore, un numero maggiore di iniezioni rispetto alle due dei sistemi Common Rail di prima generazione. In questo modo, la quantità di gasolio bruciata all’interno del cilindro resta invariata, ma viene ulteriormente frazionata, ottenendo una combustione più graduale.

Il concetto, quindi, che sta alla base delle iniezioni multiple è quello di suddividere l’iniezione principale in una sequenza di tre iniezioni ravvicinate (Pre-Main-After), mantenendo la possibilità di attuare le iniezioni Pilot e Post con molta più flessibilità temporale. Con questo approccio la durata dell’iniezione principale può essere gestita indipendentemente dalla pressione di iniezione (Fig.I.16).

La pre-iniezione permette di controllare la velocità di combustione della fase premiscelata, riducendo il rumore di combustione e favorendo l’accendibilità e quindi il comportamento del motore a freddo in termini di emissioni acustiche e di idrocarburi (fumosità azzurra). La Pre ha quindi le stesse funzioni dell’iniezione pilot nei CR di prima generazione, garantendo però, rispetto ad essa, valori più bassi di particolato (soot) e CO.

L'iniezione After, posizionata alcune centinaia di microsecondi dopo la main, produce un innalzamento della temperatura in camera di combustione, favorendo una post-ossidazione del soot, generato nella fase di combustione, e consentendo così di migliorare il trade-off tra emissioni di NO_x e di particolato. Una post-iniezione, più ritardata rispetto alla principale (late post injection), è invece necessaria per consentire la rigenerazione del filtro anti-particolato anche ai carichi parziali, dove la temperatura dei gas di scarico sarebbe troppo bassa, oppure per desolforare i catalizzatori magri destinati all'abbattimento degli NO_x . La possibilità di gestire la temperatura allo scarico è un'esigenza imprescindibile per il conseguimento di un'elevata efficienza dei sistemi di abbattimento degli inquinanti. Un ulteriore vantaggio della late post injection è la sua capacità di fornire degli idrocarburi per i catalizzatori magri per gli NO_x (Fig.I.17).

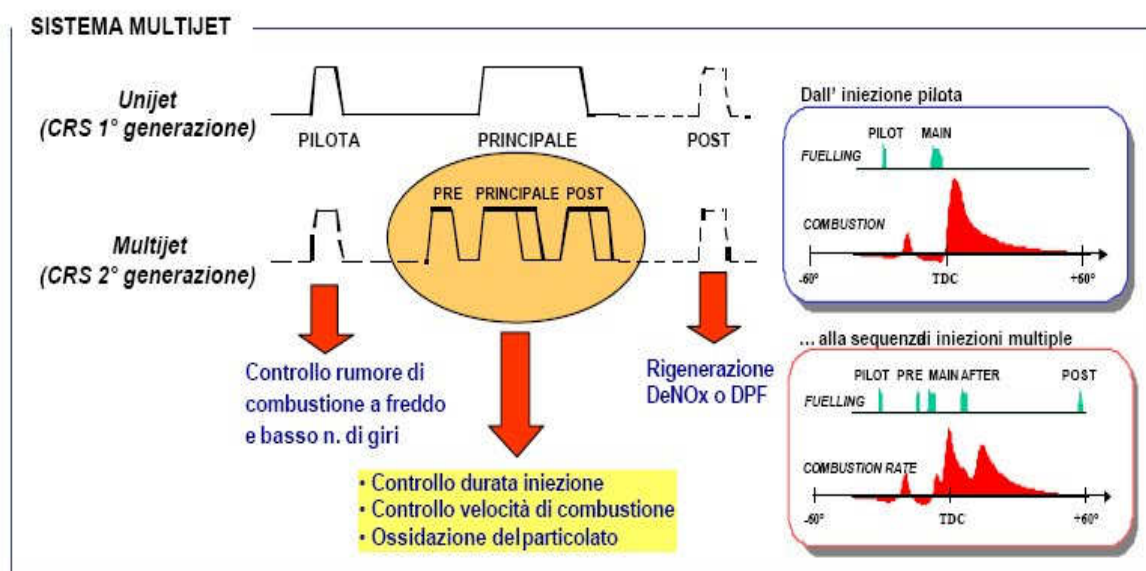


Fig. I.16: Confronto tra segnali Unijet e multijet con strategia a 5 iniezioni.

Un sistema di iniezione capace di gestire in modo completamente flessibile il numero di iniezioni, il loro posizionamento angolare e la quantità introdotta, consente di definire, in ogni condizione di funzionamento del motore, la strategia di iniezione ottimale in termini di emissioni, rumorosità, prestazioni e consumo.

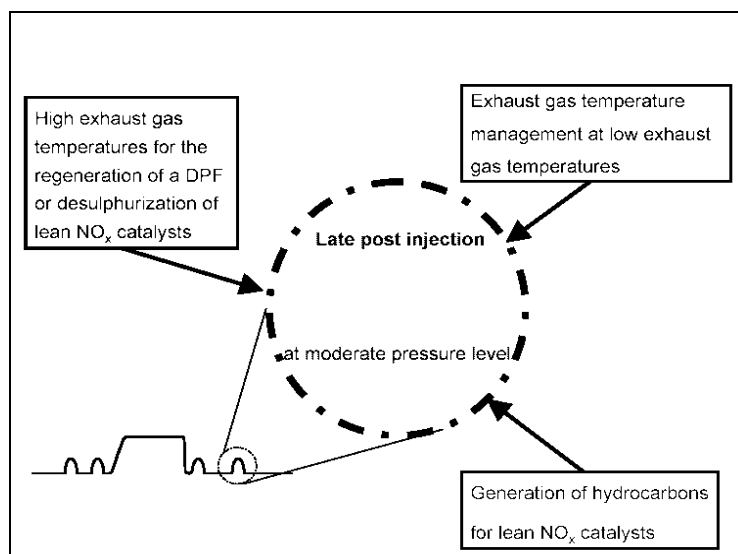


Fig. I.17: Vantaggi della “Late post injection”.

Un intenso lavoro di ricerca e sviluppo ha portato al miglioramento delle caratteristiche dei due componenti chiave del Common Rail: gli iniettori e la centralina per il controllo del motore. In particolare, la caratteristica fondamentale richiesta per l'applicazione delle iniezioni multiple consiste nella capacità di attuare iniezioni sequenziali con un piccolo dwell time (il dwell time è il tempo che intercorre tra la fine di una iniezione e l'inizio della seguente).

Lavorando sulla servovalvola dell'iniettore è stato possibile migliorarne le caratteristiche, riuscendo a gestire iniezioni con dwell time fino a poche decine di microsecondi.

Altresì è possibile utilizzare iniettori piezoelettrici in cui il solenoide è costituito da un piezoelettrico a più strati. Questi sottilissimi elementi di ceramica, dello spessore di 80 μm , sono realizzati con cristalli di piombo, zirconio e titanio che vengono polarizzati al passaggio della corrente. Tali iniettori sono in grado di esplicare notevoli forze in funzionamento e tempi di azionamento particolarmente ridotti. Infatti le dinamiche degli iniettori tradizionali sono dell'ordine di 0.4 ms mentre con i tipi piezoelettrici si scende a 0.1 ms. Tali tempi di attuazione sono particolarmente indicati per le iniezioni multiple.

L'iniettore piezoelettrico ha tempi di risposta molto ridotti, perché gli impulsi elettrici che riceve fanno cambiare istantaneamente lo stato del quarzo. Se si volesse ottenere le stesse prestazioni con un iniettore elettromagnetico tradizionale, sarebbe necessario impiegare correnti molto elevate ed una elettronica notevolmente costosa e sofisticata.

Sono state inoltre sviluppate centraline di controllo in grado di gestire fino a 5 iniezioni consecutive per ciclo di combustione.

Bibliografia

- [1] G. Ferrari, *Motori a Combustione Interna*, Ed. Il Capitello
- [2] R. della Volpe, M. Migliaccio, *Motori a combustione interna per autotrazione*, Liguori editore, 1995.
- [3] J. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, Mc Graw-Hill
- [4] S. Umbertini, *Alimentazione del combustibile e moto della carica nei moderni motori Diesel*, Università di Roma “Tor Vergata” – Dispense del Corso di Motori a Combustione Interna
- [5] L. Postrioti, *I sistemi di iniezione Common-Rail Diesel*, Università di Perugia - Dispense del Corso di Macchine a Fluido A.A. 2003/2004
- [6] L. Marchitto, tesi di laurea: *Apparati di iniezione common rail per motori diesel heavy duty: strategie di iniezione e caratterizzazione dei getti di combustibile*, Relatore M. Migliaccio (DiME-UniNa) Co-relatore Dr. L. Allocca, Istituto Motori C.N.R., 2006

CAPITOLO II

TIPOLOGIA DEI COMBUSTIBILI PER AUTOTRAZIONE

II.1. Introduzione

Nell'intento di risolvere, il compromesso “prestazioni - consumi - emissioni”, dei motori a combustione interna, si può agire oltre che sul sistema di alimentazione (Common Rail) ed il meccanismo di combustione (HCCI, PCCI) e su sistemi allo scarico (trappole sia per il particolato sia per gli ossidi di azoto) anche sul tipo e qualità del combustibile utilizzato.

I motori utilizzati nel campo dell'autotrazione sono, col passare degli anni, costantemente soggetti a regolamentazioni sempre più stringenti in termini di emissioni; per i benzina tali restrizioni risultano di semplice ottemperanza, mentre per i diesel il problema è ben più difficile da risolvere. Nel prossimo futuro, fermo restante lo stato dell'arte, per quanto riguarda il gasolio sarà difficile soddisfare i limiti richiesti soprattutto in termini di ossidi di zolfo; se poi a ciò aggiungiamo il crescente prezzo del barile ne consegue che una strada favorevole da percorrere è quella dell'utilizzo dei biocombustibili, che oltre ad essere privi di zolfo sono, almeno attualmente, privi, o quasi a seconda della zona geografica, di imposte.

Nei motori a combustione interna, l'energia termica che viene trasformata in lavoro meccanico è fornita dalle reazioni chimiche di ossidazione del combustibile con l'ossigeno dell'aria. Queste reazioni avvengono nella camera di combustione dei motori stessi e devono completarsi in un periodo di tempo dell'ordine di unità di millisecondi liberando la maggior energia termica possibile, senza lasciare troppi residui e produrre sostanze tossiche.

La preparazione della miscela aria-combustibile, tale da poter reagire rapidamente richiede tempi e grado di omogeneità dipendenti dalla tipologia del motore e dal sistema di alimentazione:

Nei motori ad accensione comandata la miscela è formata esternamente al cilindro, nei condotti di aspirazione. Il combustibile deve evaporare facilmente e mescolarsi con l'aria aspirata dal motore (o introdotta nei cilindri se sovralimentato) formando con essa una miscela la più omogenea possibile.

Nei motori ad accensione per compressione, la miscela aria-combustibile viene formata internamente al cilindro, il combustibile viene iniettato verso la fine della fase di compressione e deve facilmente polverizzarsi, penetrare, evaporare e mescolarsi con l'aria compressa.

I combustibili idonei per i motori a c.i. dovrebbero presentare i seguenti requisiti:

- ✓ Abbondante disponibilità, facilità di preparazione e basso costo;

- ✓ Alto potere calorifico per unità di massa e di volume e facilità di trasporto/distribuzione e conservazione;
- ✓ Rapidità di avviamento e sviluppo del processo di combustione, con ogni temperatura ambiente;
- ✓ Combustione completa con assenza di prodotti tossici;
- ✓ Assenza di depositi e prodotti corrosivi sulle pareti della camera di combustione e del cilindro.

Altre caratteristiche, non secondarie, ma che completano i requisiti che devono possedere i combustibili per i motori a c.i., sono:

- ✓ Resistenza alla detonazione, misurata attraverso il numero di Ottano (per motori ad accensione comandata);
- ✓ Accendibilità, misurata attraverso il numero di Cetano (per motori ad accensione per compressione);
- ✓ Volatilità: essa è una proprietà importante del combustibile perché influenza il comportamento del motore all'avviamento a freddo e in accelerazione, nonché il corretto funzionamento del circuito di alimentazione per motori ad accensione comandata, mentre nel caso di motori ad accensione per compressione influenza l'evoluzione dello spray in camera di combustione, condizionando la vaporizzazione delle gocce ed il conseguente miscelamento con l'aria.

Attualmente per ragioni di abbondanza e convenienza economica per l'estrazione, facilità di trasporto e alta densità energetica più del 90% dei combustibili usati nei motori sono dei liquidi ricavati dalla distillazione del petrolio. Una loro classificazione può essere fatta in funzione della temperatura di distillazione. In ordine crescente si distingue la benzina, il cherosene, il gasolio e l'olio combustibile. I primi due utilizzati nei motori a ciclo Otto mentre gli ultimi due nei motori a ciclo Diesel, in particolare l'olio è utilizzato nei grandi motori ad accensione per compressione quali i motori marini di grosse dimensioni e i motori per la produzione di energia elettrica o in impianti fissi per la produzione di lavoro meccanico. I combustibili di origine fossile più utilizzati per l'autotrazione sono la benzina per i motori ad accensione comandata ed il gasolio per quelli per compressione.

I combustibili gassosi sono facilmente miscibili con l'aria, ma hanno una bassa energia per unità di volume, con conseguenti problemi di trasporto e stoccaggio. I più utilizzati, per disponibilità e caratteristiche di impiego sono il metano e il GPL, esclusivamente in motori ad accensione comandata, per ragioni di convenienza economica. I combustibili gassosi possono essere utilizzati anche nei motori Diesel utilizzati per il trasporto urbano o in impianti fissi. Questi motori possono avere un'alimentazione mista gasolio-metano. Il metano viene mescolato all'aria nel collettore di aspirazione, mentre un'iniezione pilota di gasolio avvia la combustione.

I combustibili alternativi (al petrolio) si possono classificare in molteplici modi, tutti ugualmente validi:

- ✓ combustibili alternativi di origine fossile (metano e GPL);
- ✓ combustibili alternativi rinnovabili, fra i quali sono annoverati
- ✓ biocombustibili;
- ✓ combustibili alternativi sintetici;
- ✓ combustibili puramente idrocarburici;
- ✓ combustibili contenenti composti ossigenati.

Un combustibile può perfino appartenere a più categorie; il biodiesel, per esempio, è un biocombustibile rinnovabile, è un combustibile sintetico e contiene ossigeno.

I combustibili alternativi possono essere suddivisi per tipologia di motore, dal momento che ciascuno possiede ben precise proprietà fisico-chimiche che si possono prestare alla realizzazione di un determinato ciclo termodinamico. Metano ed etanolo, adatti a un motore ad accensione comandata, possono essere sfruttati anche da un propulsore ad accensione per compressione, previa particolari modifiche da apportare al sistema di alimentazione e l'impiego di una diversa strategia di controllo dell'iniezione. Rientrano, pertanto, nella tipologia di combustibili bivalenti ossia adatti a entrambi i tipi di motori a combustione interna.

Nei motori ad accensione comandata possono essere utilizzati quali combustibili alternativi l'etanolo, il metanolo e il butanolo.

Nei motori ad accensione per compressione il biodiesel è attualmente il più utilizzato, ma possono essere utilizzati l'olio vegetale e il DME (DiMetil-Etere).

I combustibili alternativi più utilizzati per l'autotrazione sono il GPL ed il metano per i motori ad accensione comandata ed il biodiesel per quelli per compressione.

II.2. I combustibili per motori a ciclo Diesel utilizzati nella sperimentazione

II.2.1. Il gasolio

Il gasolio è generalmente un prodotto della distillazione primaria del greggio e fino a non molti anni fa la sua qualità, dipendeva sostanzialmente dalle caratteristiche del greggio stesso e dalle modalità di distillazione.

Negli anni più recenti hanno trovato sempre maggiore impiego componenti da impianti di conversione come per esempio tagli da cracking o da hydrocracking termico e/o catalitico, e quindi l'influenza della qualità del greggio, seppur sempre importante, si è attenuata.

Mediamente il gasolio ha un intervallo di distillazione compreso tra 160°C e 380°C.

Il numero di cetano, le proprietà a freddo, come il punto di intorbidamento o il CFPP (Cold Filter Plugging Point), e la lubricity sono le caratteristiche più importanti del punto di vista dell'utilizzo del prodotto.

Il numero di cetano indica la capacità di accensione di un gasolio. Tanto più alto è tale numero tanto più facilmente il gasolio può autoaccendersi nel motore diesel. Oggi il minimo numero di cetano richiesto nei normali gasoli per autotrazione è 51 (UNI EN ISO 5165).

Altra caratteristica importante è il punto di intorbidamento che rappresenta in gradi Celsius quella temperatura alla quale compaiono nel gasolio le prime formazioni solide (cere). In altri termini indica la temperatura più bassa alla quale il gasolio può fluire nel sistema di alimentazione senza creare problemi. Uno dei problemi che ad esempio la formazione di cere può comportare è la rapida otturazione del filtro del gasolio impedendone il passaggio e quindi l'alimentazione del motore. La norma UNI EN 23015 fornisce il limite superiore per tale valore che è 0°C.

Un ulteriore metodo per rilevare le proprietà a freddo del gasolio è la determinazione del Punto di intasamento a freddo dei filtri detto CFPP (Cold filter plugging point) rilevato attraverso dei metodi standardizzati. Il limite superiore per tale valore ci viene imposto dalla norma UNI EN 116 che dal 1° Novembre varrà -12 °C. Per tale ragione il gasolio per autotrazione ha una sua “stagionalità” e durante il periodo invernale e' disponibile con una qualità particolare per le zone montane: il gasolio alpino, speciale per motori diesel può funzionare fino a temperature inferiori ai 21° sottozero.

La terza caratteristica rilevante è la lubricity, ovvero il potere lubrificante. A seguito delle continue riduzioni del contenuto di zolfo nei gasoli autotrazione per ragioni ambientali, il processo di desolforazione e' stato sempre più spinto con la conseguenza però anche della eliminazione dei componenti che naturalmente conferivano al gasolio un potere lubrificante (lubricity). La norma di riferimento è la UNI EN ISO12156-1 ed impone un valore massimo di 460 µm.

La specifica di riferimento europea che armonizza in tutta l'Europa Occidentale le specifiche nazionali del gasolio per autotrazione é la EN 590 emanata dal CEN, che è stata recepita in Italia come UNI EN 590. Le caratteristiche del gasolio che hanno un impatto ambientale sono direttamente definite dall'Unione Europea nella Direttiva 2009/30/CE. Tra queste il contenuto di zolfo, per cui dal 1° gennaio 2009 tutti i gasoli commercializzati sono privi di zolfo. Accogliendo le indicazioni delle Direttive Europee, la specifica tecnica del gasolio per autotrazione si è evoluta per consentire la miscelazione di biodiesel fino al valore attuale del 7% in volume di questo biocarburante.

Property / Proprietà	Unit/unità	Lower limit/limite inferiore	Upper limit/ limite superiore	Test method / metodo di prova
Cetane index / Indice di cetano		46,0	-	EN ISO 4264
Cetane number / Numero di cetano		51,0	-	EN ISO 5165
Density at 15°C / Densità a 15 ° C	kg/m ³	820	845	EN ISO 3675, EN ISO 12185
Polycyclic aromatic hydrocarbons / idrocarburi policiclici aromatici	% (m/m)	-	11	EN ISO 12916
Sulphur content / contenuto in zolfo	mg/kg	-	10,0	EN ISO 20846, EN ISO 20884
Flash point / Punto d'infiammabilità	°C	55	-	EN ISO 2719
Carbon residue (on 10% distillation residue) / Residuo di carbonio (sul residuo di distillazione del 10%)	% (m/m)	-	0,30	EN ISO 10370
Ash content / contenuto Ash	% (m/m)	-	0,01	EN ISO 6245
Water content / contenuto di acqua	mg/kg	-	200	EN ISO 12937
Total contamination / Contaminazione totale	mg/kg	-	24	EN ISO 12662
Copper strip corrosion (3 hours at 50 °C) / Corrosione su rame (3 ore a 50 ° C)	Rating	Class 1	Class 1	EN ISO 2160
Oxidation Stability / stabilità all'ossidazione	g/m ³	-	25	EN ISO 12205
Lubricity, corrected wear scar diameter (wsd 1,4) at 60 °C / Potere lubrificante (WSD 1,4) a 60 ° C	µm	-	460	EN ISO 12156-1
Viscosity at 40 °C / Viscosità a 40 ° C	mm ² /s	2,00	4,50	EN ISO 3104
Distillation recovered at 250 °C, 350 °C / Recuperato della distillazione a 250 ° C, 350 ° C	% (V/V)	85	<65	EN ISO 3405
95%(V/V) recovered at / recuperato a 95% (V / V)	°C	-	360	
Fatty acid methyl ester content / contenuti di estere metilici di acidi grassi	% (V/V)	-	7	EN 14078

Tab II.1: proprietà fisiche che deve soddisfare il gasolio commerciale per essere venduto in Unione Europea, Islanda, Norvegia e Svizzera - Norma EN 590.

II.2.2. Il biodiesel

In sostituzione al gasolio, si possono utilizzare anche oli vegetali miscelati in una certa percentuale con esso, ma questi presentano elevata viscosità e numerose controindicazioni per i motori perciò vengono effettuate delle reazioni di transesterificazione per evitare questi inconvenienti. Il prodotto di queste reazioni prende il nome di biodiesel o FAME (Fatty Acid Methyl Esters – Estere metilico di acidi grassi) ed i reagenti oltre agli oli vegetali (soia, colza, girasole, palma, cotone, senape ed alghe) possono essere anche oli di scarto o grassi animali. Alla fine della reazione si ottengono degli esteri metilici che non né contengono zolfo né composti aromatici, per contro è presente una quantità di ossigeno ben superiore rispetto al gasolio commerciale.

L'obiettivo della reazione di transesterificazione (Fig.II.1) è di scindere il legame estereo del trigliceride iniziale ($70\div 80$ cSt) per diminuirne drasticamente la viscosità ($4\div 7$ cSt). Non sempre si opera con trigliceridi e questo può comportare alcune difficoltà di reazione, ad ogni modo come reagente si utilizza anche un alcool, in genere metanolo, si possono ottenere dei buoni risultati anche utilizzando etanolo. In entrambi i casi si deve essere in presenza di un catalizzatore, in genere basico (KOH o NaOH), che rende l'alcool più aggressivo e la reazione può essere condotta a pressione atmosferica ed a temperature non troppo elevate. Se l'acidità di un olio grezzo è molto elevata, con una reazione in ambiente alcalino si possono formare saponi come prodotto di scarto. Normalmente gli oli raffinati hanno bassa acidità e quindi si possono usare catalisi alcaline senza particolari accorgimenti. Oltre a diminuire la viscosità tale reazione induce un aumento del numero di cetano di $12\div 15$ unità.

Altro prodotto di reazione è il glicerolo (o glicerina) che può essere usata per scopi farmaceutici e cosmetici ma anche per fini attinenti alla produzione di biodiesel.

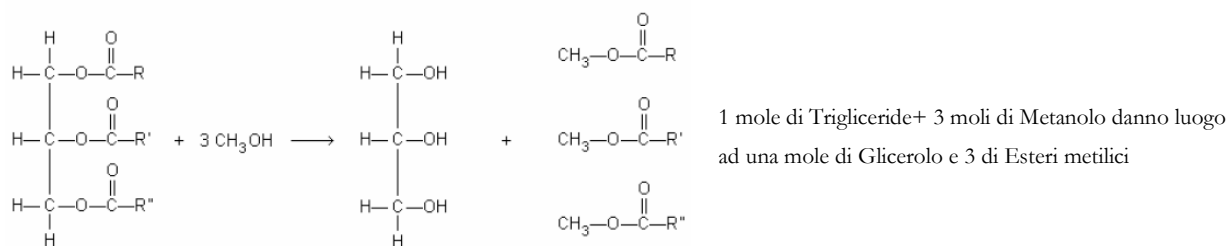


Fig. II.1: Schema di reazione della transesterificazione

Questa reazione ad un certo punto instaura un certo equilibrio tra reagenti e prodotti, quindi per aumentarne la resa si lavora in netto eccesso di alcool (facilmente recuperabile attraverso distillazione) o si può separare il glicerolo mentre si forma. Solitamente per semplici impianti la reazione dura un'ora sotto forte agitazione alla

temperatura di 45÷60 °C, oppure a 32 °C con 4 ore di agitazione. Per comprendere meglio il meccanismo di questa reazione si riporta nella figura che segue l'esempio della transesterificazione tra propilbutanoato e metanolo in ambiente basico che rappresenta al meglio l'attacco del metossido sull'estere.

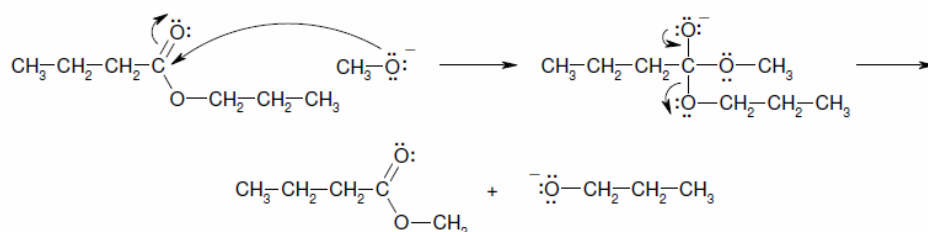


Fig. II.2: Meccanismo transesterificazione propilbutanoato

A livello industriale esistono tre differenti tecnologie di processo:

✓ Processo a medio-alta temperatura: utilizzato per grandi impianti(>20000 t/anno)

Prevede:

- Un pre-trattamento di raffinazione dell'olio eliminando le lecitine ed eventuali acidi grassi liberi, in modo da aumentare l'efficienza del processo;
- Miscelazione dell'alcool con il catalizzatore in ambiente controllato in quanto la reazione libera una notevole quantità di energia;
- Miscelazione dell'olio con il mix alcool/catalizzatore. Normalmente si opera si opera con il doppio (6:1) della quantità stechiometrica che vuole, per ogni mole di olio, tre moli di alcool (3:1). L'utilizzazione di metanolo richiede di adottare, come previsto dalla legislazione, opportuni accorgimenti di sicurezza. Tale operazione può avvenire in continuo con grossi impianti oppure in batch (discontinuo) utilizzando agitatori. La miscela viene fatta reagire a 70 °C per un'ora. L'ambiente di reazione è corrosivo, per cui tutta l'impiantistica deve essere realizzata in acciaio inossidabile e in materiale plastico;
- Purificazione del metilestere per eliminare le tracce della fase idrofila (glicerolo, eccesso di metanolo, catalizzatore). Normalmente si eseguono semplici lavaggi con acqua del prodotto che successivamente viene fatto decantare o viene centrifugato;
- Recupero dell'alcool in eccesso per mezzo di un procedimento di evaporazione sottovuoto (stripping) e la sua reimmissione nel ciclo. Tale operazione si esegue sia sul prodotto (metilestere) che sulla fase acquosa contenente glicerolo;

- Raffinazione della glicerina ottenuta in funzione dei differenti utilizzi.

✓ Processo a temperatura ambiente: utilizzato per piccoli impianti (1000÷3000 t/anno)

Richiede poca energia e, quindi, è relativamente economico; può essere utilizzato per esterificare oli grezzi o oli esausti di frittura, ma in tal caso si devono dosare i reagenti (soprattutto il catalizzatore) in funzione della composizione, molto variabile, della materia prima e si deve usare l'accortezza di non miscelare stock differenti. Il processo prevede:

- Analisi dello stock da trattare per poter individuare le giuste quantità di reagenti;
- Miscelazione dell'alcool con il catalizzatore (normalmente idrossido di potassio) in ambiente controllato. Si osserva un certo consumo di catalizzatore (alcalino) perché tale reagente reagisce con gli acidi della miscela e crea dei saponi.
- Miscelazione dell'olio con il mix alcool/catalizzatore in un primo tank (Batch 1). Normalmente si opera con il doppio della quantità stechiometrica (6:1). Tale miscela viene reagire e fatta decantare, successivamente la frazione idrofila viene allontanata dal fondo del tank. L'intero processo dura 8 ore circa a 20 °C;
- Travaso della fase idrofobica contenente il metilestere in un altro tank (Batch 2) nel quale si ripete il processo di miscelazione con alcool e catalizzatore al fine di raggiungere un buon livello qualitativo del prodotto finale. I processi più semplici riducono al minimo, sino a quasi annullarlo, l'impiego di acqua (che implica sempre problemi di smaltimento) per il lavaggio del prodotto;
- Neutralizzazione del catalizzatore con acido fosforico con conseguente produzione di fosfato di potassio (utilizzabile come fertilizzante);
- Recupero dell'alcool in eccesso per mezzo di un procedimento di evaporazione sottovuoto (stripping) e la sua reimmissione nel ciclo.

✓ Processo continuo ad alta temperatura e pressione

Come accennato il processo di esterificazione è normalmente discontinuo, ma per impianti con elevata capacità si può utilizzare un processo in continuo caratterizzato da elevate pressioni e temperature di reazione, dall'uso di catalizzatore acido e quindi dalla possibilità di utilizzare oli con acidità fino al 4%; altro vantaggio è la produzione di glicerina che non richiede successiva raffinazione. Il processo continuo prevede:

- Riduzione del contenuto di fosforo fino a 25-50 mg/kg;
- Miscelazione dell'olio con metanolo (purezza del 99.5 %) e con il catalizzatore;

- Riscaldamento a 200°C e la pressurizzazione a 5 MPa della miscela in un reattore;
- Recupero del metanolo in eccesso per evaporazione e stripping;
- Decantazione della miscela per separare l'estere dalla fase acquosa;
- Lavaggio della miscela con acqua;
- Asciugatura dell'estere;
- Distillazione del composto per ottenere una purezza del 99 % in metilestere. I mono-, di- e tri-gliceridi residui vengono reimmessi nel processo;
- Distillazione di tutte le frazioni per recuperare il metanolo che viene reimpresso nel processo (purezza del 98,5%);
- Concentrazione della glicerina per usi industriali (82-88%) o per usi farmaceutici (99%).

Comune a tutti i processi è il controllo della qualità e l'eventuale aggiunta di additivi (gli stessi utilizzati per il gasolio). In genere, vengono verificati: contenuto in esteri e glicerina; flash-point (affetto dal metanolo residuo); contenuto di catalizzatore o di acido utilizzato per l'arresto della reazione. Se la qualità non è soddisfacente, il prodotto viene rinviato a monte dell'impianto.

II.3. Oli per la produzione di biodiesel

Una discreta varietà di biolipidi può essere usata per produrre il biodiesel. Tra questi troviamo:

- ✓ Oli vegetali vergini: l'olio di colza o di soia è quello più comunemente usato, anche se altre coltivazioni come, senape, olio di palma e alghe sono promettenti;
- ✓ Olio vegetale di scarto;
- ✓ Grassi animali.

Molti sostenitori suggeriscono che l'olio vegetale di scarto sia la miglior fonte di olio per la produzione del biodiesel. Comunque, le forniture disponibili sono decisamente meno della quantità di combustibile derivato dal petrolio che viene bruciato per i trasporti e il riscaldamento domestico in tutto il mondo.

Secondo l'Environmental Protection Agency (EPA) degli Stati Uniti, i ristoranti degli USA producono circa 13,6 milioni di litri (3 milioni di galloni) di olio da cucina di scarto all'anno, mentre ad esempio in Italia si consumano annualmente 39 miliardi di litri di gasolio e benzina. Anche se è economicamente vantaggioso usare gli oli vegetali di scarto per produrre il biodiesel, è ancor più profittevole utilizzarli per convertirli in prodotti come il sapone. Perciò, la gran parte degli oli vegetali di scarto non viene gettato in discarica, ma usato per altri scopi. I grassi animali hanno limitazioni simili nella disponibilità, e non sarebbe efficiente

allevare animali solo per il loro grasso. Comunque, produrre biodiesel con grassi animali che altrimenti verrebbero scartati potrebbe sostituire una piccola percentuale del diesel di petrolio.

Per avere una fonte veramente rinnovabile di olio, dovrebbero essere considerate coltivazioni apposite. Le piante utilizzano la fotosintesi per convertire parte dell'energia del sole in energia chimica. Parte di questa energia chimica viene immagazzinata nel biodiesel e rilasciata quando bruciata. Ne risulta che le piante potrebbero fornire una fonte sostenibile per la produzione di biodiesel. Ecco una stima della produzione media di alcune piante (in m^3/km^2):

- ✓ Soia: da 40 a 50
- ✓ Senape: 130
- ✓ Colza: da 100 a 140
- ✓ Olio di Palma: 610
- ✓ Alghe: da 1.000 a 2.000

La coltivazione di alghe unicellulari per estrarre olio per biodiesel non è stata ancora intrapresa commercialmente, ma studi condotti per stimarne l'efficacia sono arrivati a indicare rese per l'Italia di 10-20 tonnellate annue di olio vegetale puro per ettaro e quindi di biodiesel. Varietà specialmente selezionate di senape possono produrre quantità di olio ragionevolmente elevate, e hanno il valore aggiunto di poter utilizzare alcuni scarti della produzione come un pesticida biodegradabile.

I baccelli di soia non sono una fonte efficiente per la produzione di biodiesel, ma, dato che negli Stati Uniti c'è ampia disponibilità di soia, che viene usata per usi alimentari anche dopo l'estrazione dell'olio, la soia è diventata la fonte primaria di biodiesel.

Ci sono filoni di ricerca per trovare coltivazioni con una rendita di olio più elevata, ma con le tecniche attuali vaste aree di terreno dovrebbero essere messe in produzione per ottenere abbastanza olio con cui sostituire l'utilizzo attuale dei combustibili fossili, entrando in competizione con le coltivazioni alimentari o comunque esponendo ulteriori aree di terreno all'erosione e al rischio di desertificazione.

II.4. Proprietà chimico-fisiche dei biodiesel

Le caratteristiche del metilestere di olio vegetale sono sensibilmente differenti da quelle dell'olio grezzo di partenza in quanto il processo di transesterificazione ne modifica profondamente le proprietà. I parametri che si vanno ad analizzare per la caratterizzazione del biodiesel possono essere descritti come segue:

Acidità totale

È un parametro che esprime la quantità in milligrammi di idrossido di potassio (KOH) necessari per neutralizzare gli acidi grassi liberi in un grammo d'olio. Alti valori possono essere dannosi per il motore in quanto possono corrodere le parti metalliche di quest'ultimo e dei serbatoi dove viene stoccato. Il valore deve essere inferiore ai 0,5 mg KOH/g.

Analisi di carbonio, idrogeno e ossigeno

Analisi delle concentrazioni di carbonio, idrogeno e ossigeno, danno i valori in tabella 1 nella quale sono anche riportati i valori del gasolio:

Combustibile	Carbonio	Idrogeno	Ossigeno
Metilestere olio di soia	77	12	11
Gasolio 2D	87	13	0

Tabella II.2: Analisi di Carbonio, Idrogeno ed Ossigeno per metilestere di olio di soia e gasolio

Come si può osservare il metilestere ha un elevato contenuto di ossigeno, che sfavorisce la combustione diminuendo il potere calorifico, ed aumenta gli NO_x.

Distillazione

Descrive la volatilità del combustibile cioè la sua tendenza a passare in fase vapore, quindi elevati valori di temperatura di distillazione corrispondono a bassa volatilità e alla possibilità di inadeguata vaporizzazione nella camera di scoppio e quindi si possono avere combustioni incomplete, processi di cracking, formazione di composti di condensazione e, molto pericolosi, IPA4. Il punto iniziale vaporizzazione è sempre più alto in confronto con il gasolio (280-320 °C), mentre il punto finale non supera i 400 °C, perciò i problemi di craking sono sensibilmente ridotti.

Massa volumica

La massa volumica esprime la massa dell'unità di volume (simile alla densità) e serve a fini fiscali per quanto riguarda la conversione da massa a volume. Questo valore per qualsiasi metilestere dipende dalla massa volumica dell'olio grezzo di origine. Il valore medio si aggira attorno a 0.88 kg/dm³.

Numero di cetano

Indica il comportamento del combustibile all'accensione e quindi influenza l'avviamento a freddo, la rumorosità del motore oltre alla qualità della combustione. Il numero di cetano è indice del tempo che intercorre tra iniezione e combustione. Più alto è questo valore, maggiore è la prontezza del combustibile all'accensione. Il valore di questo parametro per un estere metilico varia da 46 a 51 in funzione dell'olio di partenza. Il tipico valore del numero di cetano per un gasolio normale va da 40 a 55 (N°2 D), mediamente 49

nei climi temperati (secondo le specifiche EN 590) e leggermente più basso, 45-47, per i climi artici. In tabella II.3 sono riportati i numeri di cetano per alcuni metilesteri.

Combustibile	Numero di cetano
Metilestere olio di soia (Soybean Methyl Ester SME)	48
Metilestere olio di colza (Rape Methyl Ester RME)	54
Metilestere olio di girasole	49
Metilestere olio di palma	62
Metilestere olio di cotone	49
Gasolio 2D	48

Tabella II.3: Numero di cetano per alcuni metilesteri e gasolio

Il numero di cetano del biocombustibile dipende, oltre che dalla specie oleaginosa di partenza, anche dalle condizioni climatiche della zona in cui cresce la coltura, in quanto climi diversi determinano una diversa composizione chimica dei semi. Il numero di cetano dipende anche dalla miscela di acidi grassi presenti nel metilestere, ogni acido grasso infatti ha un proprio numero di cetano così come riportato in tabella II.4.

Metilestere	Nome comune	Purezza [%]	Numero di Cetano
Me 8:0	Metil-ottano	98.6	33.6
Me 10:0	Metil-decano	98.1	47.2
Me 12:0	Metil-laurato	99.1	61.4
Me 14:0	Metil-miristato	96.5	66.2
Me 16:0	Metil-palmitato	93.6	74.5
Me 18:0	Metil-stearato	92.1	86.9

Tabella II.4: Numero di cetano rapportato alla purezza di alcuni metilesteri

Punto d'infiammabilità (Flash Point)

È la temperatura minima alla quale i vapori di un composto si accendono in presenza di fiamma in condizione di pressione atmosferica. Se il valore è troppo basso vi possono essere composti volatili come il metanolo nel biodiesel. Più alto è il valore di flash point, più sicuro è lo stoccaggio del combustibile. Vari valori si possono ricavare dalla tabella 4.

Punto di intasamento a freddo dei filtri – CFPP

Il CFPP si definisce come la temperatura più alta prima del quale un liquido non passa attraverso un filtro o ci mette troppo tempo per attraversarlo: è quindi un metodo per verificare il comportamento di un olio alle basse temperature. Esistono in commercio additivi che migliorano le caratteristiche a freddo del biodiesel. Il biodiesel da colza prodotto in Austria ha un CFPP compreso tra 10°C e -15°C, mentre il biodiesel da soia ha un CFPP di circa -4°C.

Combustibile	Flash point [°C]
Metilestere di olio di soia (SME)	155
Metilestere di olio di girasole	182
Metilestere di olio di cotone	110
Metilestere di olio di colza (RME)	160
Gasolio 2D	72

Tabella II.5: Punto d'inflammabilità per alcuni metilesteri e gasolio

Punto di intorbidimento e di scorrimento

Il punto di intorbidimento rappresenta la temperatura più bassa oltre la quale iniziano a formarsi delle particelle solide (cere) e quindi liquido non può più essere pompato se non causando problemi; il punto di scorrimento indica la temperatura alla quale cessa il flusso di combustibile. Le caratteristiche a freddo del Biodiesel migliorano considerevolmente rispetto all'olio grezzo, anche se qualche cautela è d'obbligo quando si utilizza il biodiesel in condizioni invernali. Anche in questo caso l'utilizzo di miscele risolve parzialmente il problema. In tabella 5 sono indicati parametri di intorbidimento e scorrimento di vari metilesteri e gasolio.

Combustibile	Punto d'intorbidimento[°C]	Punto di scorrimento[°C]
Metilestere di olio di soia (SME)	-1	-3
Metilestere di olio di colza (RME)	-2	-9
Metilestere di olio di girasole	-	-7
Metilestere di olio di cotone	-	2
Gasolio 2D	-17	-26

Tabella II.6: Punto di intorbidimento e scorrimento di alcuni metilesteri e gasolio

Parametro	Variazione %
Densità	+1.22 %
Viscosità	+23.1%
Potere calorifico	-1.5%
Numero di cetano	+12%

Tabella II.7: Variazione dei parametri dell'olio di colza in seguito a stoccaggio

Stabilità all'ossidazione

In presenza di ossigeno, il Biodiesel può ossidarsi e quindi depositare gomme e cere nei serbatoio e negli elementi stazionari del motore. Questo valore si esprime in quantità di gomma formatasi in condizioni standard. Il metilestere è più stabile del corrispondente etilestere. Comunque la semplice aggiunta (0,1% - 0,3%) di antiossidanti sintetici può aumentare considerevolmente (6,5-12 volte) la stabilità. Uno studio americano ha evidenziato i cambiamenti del metilestere e dell'etilestere nell'olio di colza dopo due anni di stoccaggio e i risultati sono riportati in tabella II.7.

Lo stesso studio ha evidenziato che non esistono sostanziali variazioni nelle prestazioni di un motore alimentato con biodiesel stoccato per due anni, rispetto all'utilizzo dello stesso combustibile appena prodotto.

Viscosità

È la resistenza che le particelle di un corpo incontrano nello scorrere le une rispetto alle altre. L'unità di misura è il centiStokes (mm^2/s). Maggiore è la saturazione del composto, più lunghe sono le catene idrocarburiche, maggiore è la viscosità cinematica. La misura si effettua ad una ben precisa temperatura (40°C). Una viscosità troppo elevata crea problemi agli iniettori e quindi si rende necessario l'aumento di portata o di pressione.

Combustibile	Viscosità cinematica [cSt]
Metilestere di olio di soia (SME)	4,01
Metilestere di olio di girasole	4,60
Metilestere di olio di palma	5,70
Metilestere di olio di colza (RME)	6,00
Gasolio 2D	2,60

Tabella II.8: Viscosità cinematica di alcuni metilesteri e gasolio

In tabella II.9 si riporta un confronto fra le proprietà di biodiesel puro e gasolio in termini di intervalli di valori.

Caratteristica	Biodiesel	Gasolio
Densità (15°C) [kg/m^3]	870 ÷ 895	810 ÷ 860
Viscosità (40°C) [cSt]	3,5 ÷ 5,5	2 ÷ 3,5
Numero di Cetano	45 ÷ 65	40 ÷ 55
CFFP [$^\circ\text{C}$]	-5 ÷ 10	-25 ÷ 0
CP [$^\circ\text{C}$]	-5 ÷ 10	-20 ÷ 0
PP [$^\circ\text{C}$]	-15 ÷ 10	-35 ÷ 0
Hi [MJ/kg]	36,5 ÷ 38	42,5 ÷ 44
Contenuto acqua [mg/kg]	0 ÷ 500	-
Acidità [mg KOH/g]	0 ÷ 0,60	-
Contenuto esteri [% (w/w)]	>96	-
Contenuto glicerina [% (w/w)]	0 ÷ 0,25	-
Contenuto zolfo [mg/kg]	-	15 ÷ 500

Tabella II.9: Confronto tra biodiesel e gasolio

Anche se i biodiesel hanno un potere lubrificante superiore a quello del gasolio, questi combustibili alternativi non posso essere utilizzati puri perché, a lungo andare, a causa della presenza di impurezze, di glicerina e delle loro proprietà alle basse temperature, possono comportare la formazione di depositi, ostruzione dei filtri, danneggiamento e degradazione dei componenti che lo veicolano. Per questo motivo si preferisce lavorare con le miscele. Il nome della miscela dipende dal tipo di metilestere e dalla percentuale in volume con cui esso è miscelato con il gasolio, ad esempio la miscela al 20% di metilestere di olio di colza (Rapeseed-Methyl-Ester) si chiamerà RME20. Chiaramente le proprietà della miscela saranno intermedie, la figura II.3 mostra come

variano la densità, la viscosità e la distillazione delle miscele di metilesteri derivati dalla colza (RME) e dalla soia (SME) al variare della percentuale di metilestere.

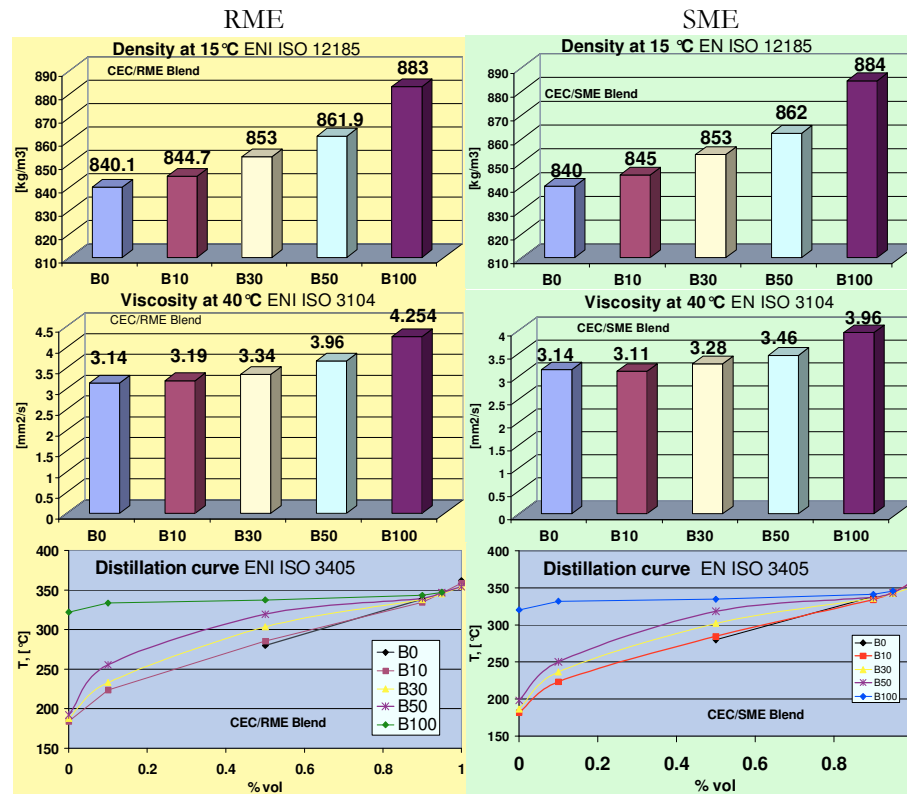


Fig. II.3 – Variazione di densità, viscosità e curve di distillazione al variare del contenuto di biodiesel in miscela.

II.3. Impatto dei biodiesel sulle prestazioni e sulle emissioni

Le pubblicazioni presenti in letteratura che mettono a confronto biodiesel e gasolio in termini di prestazioni ed emissioni sono molteplici. I confronti vengono fatti a parità di numero di giri e di coppia del motore, quindi a parità di condizioni operative. In particolare, attraverso una ricerca dei risultati sperimentali riportati in letteratura, abbiamo riportato le differenze di comportamento, per quanto riguarda le prestazioni, in potenza, consumi specifici e rendimento, e per quanto riguarda le emissioni, in NO_x , PM, THC, CO ed altri inquinanti le cui emissioni non sono ancora regolamentate.

Potenza

Negli studi che abbiamo analizzato, la potenza è risultata diminuita solo a pieno carico con l'acceleratore totalmente premuto, ed a carico parziale o con lo stesso consumo specifico o con la stessa posizione dell'acceleratore. Benché le perdite attese fossero dell'8-9 % (in base alla perdita di potere calorifico su base

volumica), quelle rilevate al banco nella maggior parte degli studi si collocavano tra il 3 ed il 7%, leggermente inferiori a quelle attese, per questo motivo tutti gli autori hanno supposto delle ipotesi di recupero di potenza. Le ragioni di tale recupero sono principalmente ascrivibili alla differente viscosità, che palesa la propria influenza nelle condizioni di pieno carico.

Per comprendere meglio tale fenomeno si può immaginare che la maggiore viscosità cinematica riduca i riflussi attraverso i giochi (leakage losses) all'interno della pompa d'iniezione, e si è visto che la portata di combustibile è risultata maggiore non solo in termini di massa ma anche in termini di volume, nonostante la maggiore densità del biodiesel. Infatti quando la temperatura del biodiesel aumentava (e quindi la viscosità diminuiva) si riducevano le differenze di portata. Invece quando le temperature dei combustibili venivano aggiustate in maniera tale da ottenere valori della viscosità prossimi, allora la portata di gasolio risultava superiore a causa della minore densità che aumenta il flusso attraverso i fori d'iniezione.

Per di più il modulo di comprimibilità e la velocità del suono sono maggiori nei biodiesel, che insieme alla maggiore viscosità si traduce in un'iniezione anticipata. Ciò accoppiato al numero di cetano superiore comporta un anticipo della combustione rispetto al gasolio. Tale ritardo è indispensabile per il gasolio affinché non si abbia un'eccessiva temperatura di picco con formazione elevata di NOx, nel contempo però il rendimento decresce e conseguentemente anche la potenza.

Sembrerebbe avere un ruolo nel recupero di potenza anche il maggior potere lubrificante che i biodiesel posseggono, ma siccome le perdite per attrito sono concentrate nella pompa ed hanno un ordine di grandezza ben inferiore alla potenza del motore è alquanto improbabile che tale proprietà estrinsechi la propria influenza ai fini del recupero di potenza.

Consumo specifico

Il consumo specifico di combustibile (BSFC) è, in un motore alternativo, il rapporto tra la massa di combustibile e la potenza effettiva erogata, ed è un parametro inversamente proporzionale al rendimento del motore. Se quest'ultimo non cambia, usando biodiesel al posto del gasolio, per una fissata condizione operativa, il BSFC dovrebbe incrementarsi di un valore intorno al 14% in funzione del minor potere calorifico inferiore posseduto dai biodiesel, in altre parole il minor potere calorifico deve essere compensato con una quantità di combustibile maggiore. Un indicatore della perdita di potere calorifico è il contenuto di ossigeno nel combustibile, che nei biodiesel è nettamente maggiore rispetto al gasolio minerale.

L'EPA (Environmental Protection Agency) degli Stati Uniti ha analizzato 39 pubblicazioni il cui argomento riguardava il consumo specifico di biodiesel puro ed in miscela in motori Heavy-Duty, senza né EGR né nessun altro post-trattamento. Hanno così ricavato la seguente correlazione:

$$bsfc/bsfc_D = e^{0,0008189\%B}$$

tale equazione è stata ottenuta con un intervallo di confidenza del 95%. Come si può vedere in figura II.4 l'incremento è quasi lineare fino a raggiungere il massimo incremento pari al 9% per il biodiesel puro (%B = 100). Siccome il massimo incremento è inferiore della perdita di potere calorifico, si intuisce che il rendimento è aumentato passando al biodiesel. Invece in altri studi, non è stata riscontrata alcuna discrepanza tra la perdita di potere calorifico e l'aumento di consumo specifico questo sta a significare che non sempre il rendimento aumenta passando da biodiesel a gasolio, però è possibile che si verifichi, anzi in alcuni casi come Haas et al. si è verificato il trend opposto.

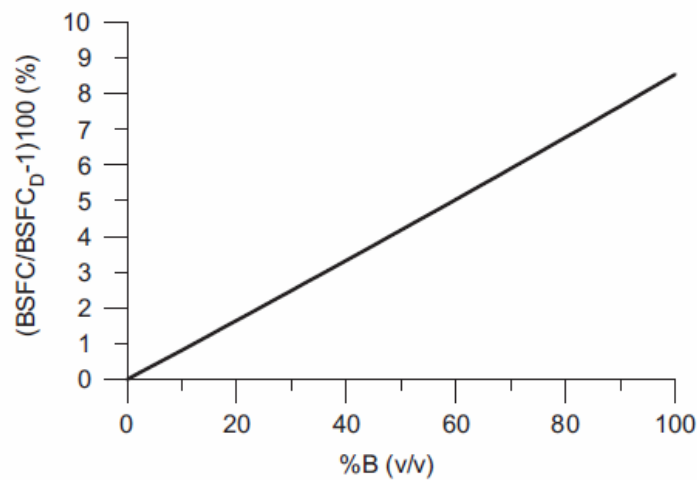


Fig. II.4: Correlazione BSFC / % Biodiesel in volume

Ad ogni modo nella maggior parte dei casi il BSFC aumenta in ragione del minor potere calorifico, ed aumenta in maniera proporzionale rispetto alla quantità di biodiesel contenuto in miscela.

Rendimento termodinamico

Il rendimento termodinamico è il rapporto tra la potenza erogata e l'energia in ingresso attraverso l'iniezione di combustibile, che è il prodotto tra la massa di combustibile iniettata ed il potere calorifico inferiore. Come detto in precedenza, nel passaggio da gasolio a biodiesel, nella maggior parte dei casi il rendimento non è affetto da alcuna variazione anche se qualche piccolo aumento lo si può riscontrare in condizione di carico parziale e per particolari miscele (tra il 10 ed il 20%) a causa del maggior potere lubrificante rispetto ai componenti puri.

Produzione degli NO_x

Nella maggior parte dei casi analizzati, l'utilizzo di biodiesel favorisce un incremento delle emissioni di ossidi di azoto quando ci troviamo a pieno carico, talvolta invece è possibile riscontrare una, seppur minima, diminuzione quando ci troviamo a carico parziale.

Per comprendere l'influenza della percentuale di biodiesel contenuto in miscela sull'emissioni di ossi di azoto riportiamo la correlazione dell'EPA US per tale valore, come fatto sopra per il BSFC, con un intervallo di confidenza del 95% :

$$\text{NO}_x/\text{NO}_{xD} = e^{0.0009794\%B}$$

questa equazione fornisce un incremento quasi lineare degli NO_x all'aumentare della percentuale in volume di biodiesel contenuto in miscela, come viene mostrato nella figura II.5:

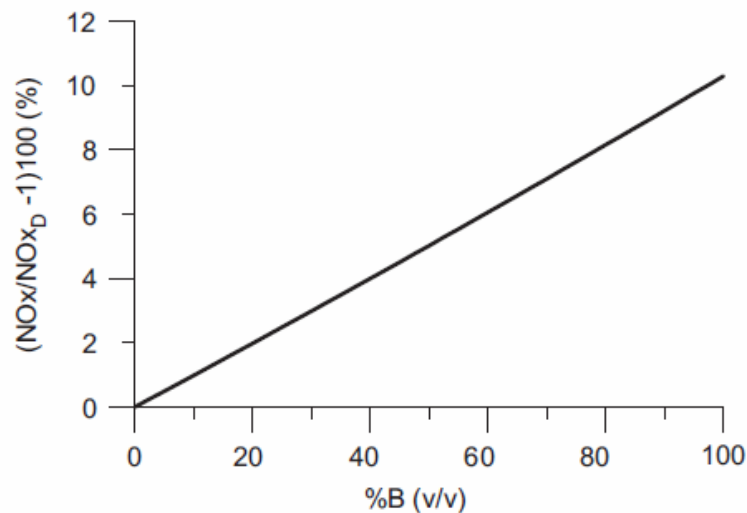


Fig. II.5 – Correlazione NO_x / % Biodiesel in volume

Il motivo di tale incremento è causato dall'anticipo dell'iniezione e quindi anche della combustione, per effetto delle diverse proprietà chimico/fisiche (densità, viscosità, comprimibilità e velocità del suono) e della mappatura della centralina elettronica che comanda i segnali di trigger agli iniettori in base al regime di funzionamento. Tale influenza è stata ampiamente comprovata. Infatti quando il biodiesel viene iniettato l'incremento di pressione prodotto dalla pompa è più rapido a causa della minore comprimibilità (maggiore modulo di comprimibilità) ed inoltre si propaga molto più velocemente verso l'iniettore per effetto della maggiore velocità del suono. Per di più la maggiore viscosità fa diminuire le perdite nei giochi della pompa, aumentando così la pressione alla mandata, conseguentemente si assiste anche ad un'apertura prematura dello spillo dell'iniettore. Tutto ciò comporta l'anticipo dell'iniezione, della combustione e l'incremento della temperatura di picco che è la causa principale dell'aumento degli NO_x . C'è inoltre da aggiungere che utilizzando il biodiesel la produzione di fuliggine (soot) è ridotta, ciò comporta una minore dissipazione di calore e quindi una maggiore temperatura in camera di combustione, fenomeno che garantisce una maggiore produzione di NO_x anche in assenza di anticipo dell'iniezione stessa.

Tuttavia anche le proprietà fisiche dello spray che hanno un peso nei confronti del ritardo all'accensione e della combustione stessa, come la distribuzione della dimensione delle gocce, il momento d'inerzia della goccia, la penetrazione, l'evaporazione di combustibile sono influenzate dalla variazione della viscosità, tensione superficiale, temperatura di evaporazione. La variazione di questi parametri porta alla maggiore produzione di NO_x .

Gli ossidi di azoto che abbiamo considerato finora sono quelli di natura termica. Esistono anche quelli *prompt*, ed il meccanismo che governa la formazione di quest'ultimi è sensibile alla maggiore concentrazione di radicali presente nella combustione di biodiesel, perciò anche i prompt risultano aumentati.

Produzione di Particolato (PM Particulate Matter)

Fatta eccezione di qualche rarissimo caso, l'utilizzo di biodiesel comporta una notevole diminuzione di PM all'aumentare della percentuale in volume di biodiesel contenuta in miscela. Come riportato in precedenza per altri aspetti, l'EPA US ha individuato la correlazione tra la concentrazione di PM e percentuale di biodiesel:

$$\text{PM}/\text{PM}_D = e^{-0.006384\%B}$$

anche in questo caso l'intervallo di confidenza è del 95%. Questa equazione contempla una riduzione prossima al 50% quando abbiamo biodiesel puro come riportato in figura II.6.

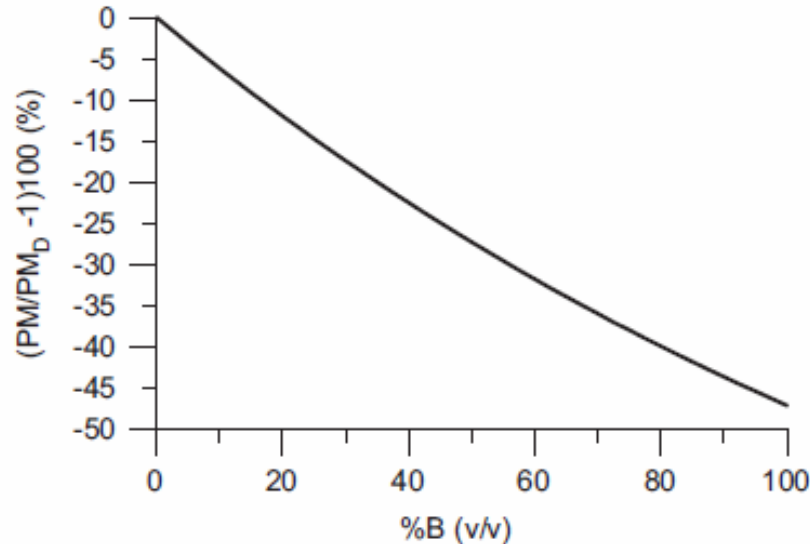


Fig. II.6: Correlazione PM / % Biodiesel in volume

I motivi di tale diminuzione sono dovuti al maggior contenuto di ossigeno, minor rapporto stechiometrico aria/combustibile, assenza di composti aromatici, anticipo della combustione, differente struttura delle particelle di fuliggine, temperature di ebollizione inferiore. Il contenuto di ossigeno all'interno delle molecole di biodiesel consente una combustione più completa anche nelle regioni della camera di combustione in cui la

miscela è ricca, e promuove l'ossidazione della fuliggine già formata. Un rapporto stechiometrico minore significa una minore necessità di aria per ottenere una combustione completa e quindi riduce la probabilità che si formino regioni di miscela ricca all'interno della camera. I composti aromatici sono considerati i precursori della fuliggine quindi l'assenza ne diminuisce la formazione. L'anticipo della combustione permette alle particelle di fuliggine tempi di residenza maggiori e quindi maggior tempo a disposizione per i processi di ossidazione, in più la differente struttura di tali particelle fa sì che anche la velocità di ossidazione è fino a 6 volte superiore rispetto al gasolio. Nonostante la temperatura media di distillazione sia più elevata, la temperatura di fine ebollizione maggiore abbassa la probabilità che fuliggine e bitumi possano essere formati da frazioni di idrocarburi pesanti che non sono riusciti a vaporizzare.

Ad ogni modo tutto ciò che permette di ottenere una combustione più completa permette di diminuire le emissioni di PM, detto ciò siccome le emissioni di NO_x sono aumentate e nel contempo diminuite quelle di PM, si presenta l'opportunità di riottimizzare il trade-off tra tali particelle, agendo sulla mappatura della centralina, per diminuire gli ossidi di azoto ed aumentare quelle di particolato in modo da collocarmi all'interno degli intervalli imposti dalla normativa. In figura II.7 riportiamo un diagramma che ci fa capire come è possibile variare queste emissioni anticipando o ritardando l'iniezione e, aumentando o diminuendo l'EGR e poi sfruttando dei post-trattamenti e possibile realizzare il percorso 0-1-2-3, stato al quale compete sia una diminuzione di NO_x sia di PM.

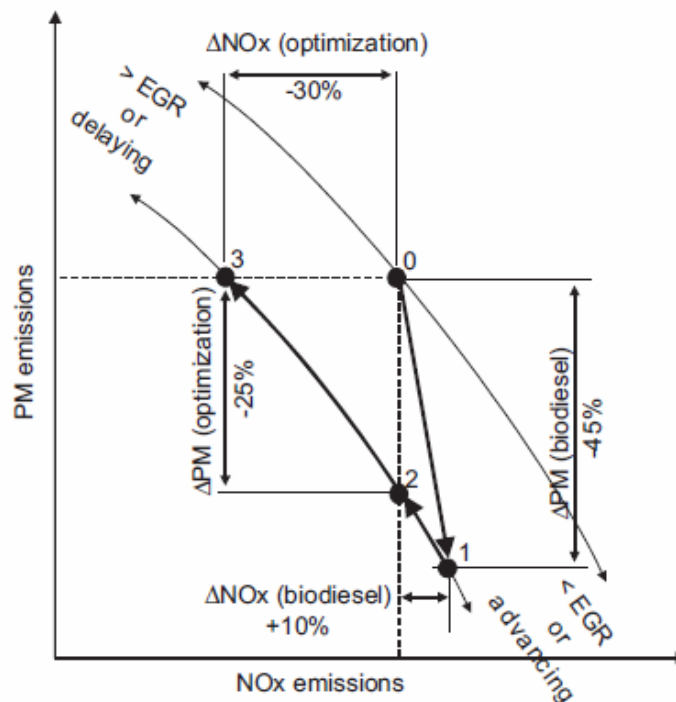


Fig. II.7: Ottimizzazione delle emissioni sfruttando il trade-off NO_x -PM

Produzione di idrocarburi totali (THC)

Il trend comune a tutti nei riguardi di questo parametro è che la gli idrocarburi incombusti diminuiscono bruscamente passando da gasolio a biodiesel. L'EPA US ha trovato la correlazione con la percentuale in volume di biodiesel anche per questo parametro:

$$\text{THC}/\text{THC}_D = e^{-0.011195\%B}$$

si può addirittura arrivare a diminuzioni prossime al 70% utilizzando biodiesel puro, come mostrato in figura II.8.

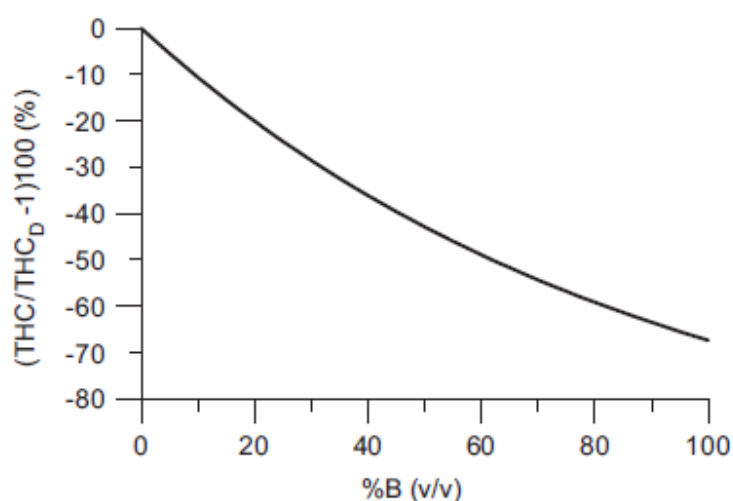


Fig. II.8: Correlazione THC / % Biodiesel in volume

Le cause di tale diminuzione sono molteplici: contenuto di ossigeno, numero di cetano, temperatura finale di distillazione, modalità di iniezione e combustione. Il maggior contenuto di ossigeno permette una combustione più completa. Il numero di cetano maggiore riduce il ritardo all'accensione e quindi aumenta il tempo a disposizione per la combustione. Anche se il biodiesel è meno volatile rispetto al gasolio, la temperatura di fine distillazione è minore rispetto al gasolio, la frazione di fine distillazione nel gasolio non viene facilmente vaporizzata e bruciata, siccome tale frazione è presente in quantità minore nei biodiesel c'è una diminuzione di THC. Anticipi sia dell'iniezione che della combustione sono i motivi principali di una combustione migliore quindi di una minore quantità di idrocarburi incombusti.

Produzione di CO

Anche il monossido di carbonio risulta diminuito nel passaggio da gasolio a biodiesel, riportiamo, come fatto in precedenza, l'equazione che l'EPA US ha individuato attraverso l'analisi di molteplici articoli, la quale lega CO alla percentuale in volume di biodiesel contenuta in miscela:

$$\text{CO}/\text{CO}_D = e^{-0.006561\%B}$$

ed il grafico di tale equazione in figura II.9, dal quale si può evincere una diminuzione media prossima al 50% nel caso di biodiesel puro.

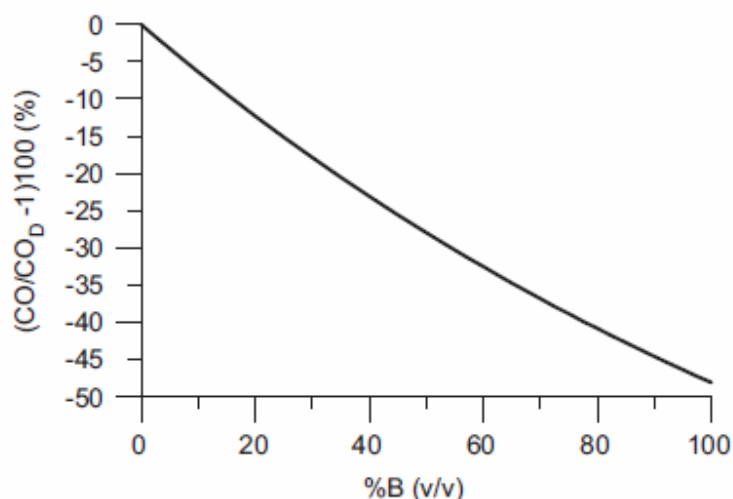


Figura II.9: Correlazione CO / % Biodiesel in volume

Le ragioni per spiegare la diminuzione di questo parametro è ascrivibile anche qui al contenuto di ossigeno maggiore che rende la combustione più completa così come l'anticipo dell'iniezione e della combustione, ed al numero di cetano che diminuisce la probabilità che si formino all'interno della camera di combustione regioni ricche di combustibile particolarmente in correlazione con l'ottenimento di monossido di carbonio allo scarico.

Inquinanti non regolamentati

Gli inquinanti ai quali ci stiamo riferendo sono principalmente i composti policiclici aromatici (IPA) e gli aldeidi.

Per gli IPA le pubblicazioni non sono molte però in quasi tutte le pubblicazioni analizzate c'è una diminuzione degli stessi. La causa è principalmente legata al fatto che sono praticamente assenti nel biodiesel puro, anche se comunque non è stato ancora individuare un trend per questo genere di inquinanti.

Per gli aldeidi invece si assiste ad una blanda diminuzione (al massimo 10%) quando si utilizza il combustibile puro, negli altri casi non si assiste ad alcuna variazione che possa essere significativamente associata alla variazione del combustibile piuttosto che al caso specifico ed ad errori di misurazione.

II.4. Impatto economia mondiale

Il biodiesel è accusato di ridurre la disponibilità di derrate alimentari e di incrementare la fame nel mondo. I dati sull'effettiva resa energetica e sull'eventuale riduzione delle emissioni di anidride carbonica sono contrastanti.

La coltivazione delle materie prime necessarie a produrli, in generale, è accusata di essere inquinante, infatti la produzione di biodiesel è molto dispendiosa anche dal punto di vista idrico. Per produrre un litro di biodiesel servono 4000 litri di acqua per l'irrigazione delle colture e durante il processo chimico di trasformazione. Le critiche alla produzione di biocarburanti attraverso grandi piantagioni stanno arrivando da parte di tutte le più importanti organizzazioni internazionali. Nel 2005, sulla rivista *Natural Resources Research*, l'ecologo David Pimentel e l'ingegnere ambientale Tad W. Patzek hanno pubblicato uno studio secondo cui sia la produzione di biodiesel da soia e girasole, sia quella dell'etanolo da mais, legno ed erba, consumano di gran lunga più energia di quanta se ne possa ricavare dai combustibili, non tenendo conto né delle tasse, né dei danni ambientali.

In alcuni stati e regioni dove è stato valutato il passaggio integrale ai biocombustibili si è giunti alla conclusione che tale soluzione avrebbe richiesto enormi estensioni di territorio se si fossero scelte le coltivazioni tradizionali. Considerando solo queste ultime ed analizzando il quantitativo di biodiesel che può essere prodotto per unità di terreno coltivato, è emerso che gli Stati Uniti, nazione con una richiesta energetica pro capite tra le più elevate, non possiede abbastanza territorio coltivabile per rifornire i veicoli della propria popolazione.

La Coldiretti ha pubblicato un documento in cui afferma che la resa media di biodiesel italiano è di circa 850 kg per ettaro, visto che la superficie agricola utile (SAU) è di circa 13 milioni di ettari nemmeno in Italia vi è la possibilità di soddisfare il fabbisogno del parco veicoli nostrano che si aggira sui 34 milioni di mezzi. Si tenga presente che il consumo medio di un veicolo è un po' sopra la tonnellata (1000 kg) l'anno di combustibile. Un semplice conteggio porta a stimare un ipotetico bisogno di 40 milioni di ettari per alimentare i veicoli italiani a biodiesel secondo le rese della Coldiretti. Si noti che l'intera superficie agricola italiana è di soli 13 milioni di ettari. In una situazione analoga sono messi tutti i paesi più industrializzati.

Un ovvio compromesso sarebbe decimare il numero di veicoli italiani e utilizzare motori diesel di piccola cilindrata e veicoli leggeri, il cui consumo arriva ad essere di 2 o 3 litri per 100 km, come ad esempio il 1200 cc TDi sulla Lupo della Volkswagen, o il progetto Twingo SMILE di Greenpeace.

Altri stati in via di sviluppo o del terzo mondo potrebbero essere in condizioni migliori ed in effetti è qui che si concentrano le produzioni di olio di palma o di etanolo da canna da zucchero. Non è però univoca

l'opinione se ciò porta benefici economici ai produttori locali oppure se si tratta di una sottrazione di terreni alle colture alimentari.

Per quanto riguarda l'olio di palma i dati 2008 indicano per la Malesia 17,7 milioni di tonnellate su 4.5 milioni di ettari di terreno coltivati con tale pianta. La resa è di circa 4000 kg di olio/biodiesel per ettaro, più di 4 volte la resa del biodiesel italiano. In tal caso basterebbero 8,5 milioni di ettari a palma da olio per i veicoli italiani.

Si tenga comunque presente che pro capite il terreno coltivabile è molto limitato: nel 2000 l'area coltivabile (SAU) nel mondo era pari a 0,11 ettari per persona (fonte FAO) in gran parte usati per produrre cibo. I veicoli mondiali sono secondo stime del DoE (Dipartimento dell'energia americano) 700 milioni e consumano molto gasolio e benzina (si consideri che i veicoli italiani consumano 1 tonnellata all'anno) ed è probabile che per alimentarle a biodiesel sia necessario coltivare una buona parte (percentuali a due cifre) dei 0.11 ettari pro capite a piante che alimenteranno i motori delle auto.

Un tale uso delle risorse agricole comporterà la presumibile uscita dal mercato alimentare di una parte enorme della popolazione mondiale e la salita dei prezzi dei terreni coltivabili. La produzione di cereali e altre materie prime per la sintesi di biocombustibili, e quella per un consumo alimentare, individuano due prodotti non sostitutivi, in presenza di una risorsa scarsa, che è la superficie coltivabile.

Molti eminenti economisti ritengono che la produzione di biocarburanti sia causa di povertà e fame nel mondo benché contribuisca alla crescita delle economie locali e alla redistribuzione della ricchezza a livello globale, creando opportunità di lavoro in zone rurali e aiutando i piccoli agricoltori ad incrementare il loro reddito. Nel mondo c'è una sufficiente disponibilità di terreno agricolo e semi-arido che a lungo termine può sostenere una coltivazione di piante con le quali produrre biocarburanti specialmente laddove i governi si impegnino nell'applicazione di soluzioni innovative per lo sviluppo sostenibile.

La domanda di biocombustibili ha indotto un rialzo del 30% del prezzo delle superfici coltivabili in vaste aree degli Stati Uniti e del Sudamerica, dei vegetali dai quali sono ottenuti, e dei prodotti sostitutivi (dal punto di vista del produttore) quali grano e cereali, la cui offerta e superficie coltivabile è diminuita in analoga quantità (i biocombustibili sono "coltivabili" nelle aree dove in precedenza crescevano cereali e grano).

I prezzi dei biocombustibili crescono per un eccesso di domanda, che registra una crescita esponenziale rispetto all'offerta mondiale (che, come già prevedeva Malthus per le disponibilità alimentari, segue una progressione aritmetica). Invece, il prezzo dei cereali aumenta per un calo dell'offerta, perché i terreni e le stesse piante sono destinate alla produzione di biocombustibili, più redditizia per i contadini di una produzione per un consumo alimentare.

Il rialzo della materia prima (grano e cereali) ha causato rincari anche per i prodotti derivati (30% la pasta, 15% i dolciumi, pane, e un aumento del prezzo dei foraggi e della carne).

La coltivazione di cereali destinati alla sintesi di bioetanolo anziché alla produzione di generi alimentari è una delle cause del rincaro dei cereali e dei relativi derivati.

In Europa e Stati Uniti i sussidi federali e comunitari per la produzione di bioetanolo sono maggiori di quelli della produzione di cereali per scopi alimentari. A ciò si aggiunge il fatto che il bioetanolo sia comunque una coltivazione più remunerativa.

II.5. Ciclo della CO₂

L'elemento carbonio è uno dei componenti essenziali della materia vivente. Buona parte della massa solida degli organismi vegetali ed animali è costituita da carbonio; esso si trova inoltre combinato con l'ossigeno sottoforma di anidride carbonica, uno dei minori ma cruciali costituenti dell'atmosfera terrestre. Il carbonio si trova anche nelle rocce come carbonato, le Dolomiti sono costituite da un minerale chiamato dolomia, un carbonato di calcio e magnesio.

Il “ciclo del carbonio” riguarda tutte le trasformazioni chimiche del carbonio a livello ambientale. Esse sono strettamente correlate fra loro a costituire appunto un ciclo in cui i prodotti di una reazione fanno da reagenti per la reazione successiva, figura II.10. Queste reazioni sono governate da delicati equilibri che possono subire interferenze da parte dell'attività umana ed alcune di queste si rivelano particolarmente dannose per lo stesso ambiente terrestre.

Il ciclo del carbonio descrive il movimento del carbonio, nelle sue varie forme, tra la biosfera, atmosfera, oceani e geosfera, figura II.10. Nel ciclo vi sono molti ‘sinks’ o magazzini di carbonio (rappresentati nella figura dai rettangoli) e processi mediante i quali i vari magazzini scambiano carbonio tra loro (in figura evidenziati dalle frecce).

Siamo familiari al modo in cui l'atmosfera e la vegetazione scambiano carbonio, le piante assorbono anidride carbonica (CO₂) dall'atmosfera durante la fotosintesi, chiamata anche produzione primaria, e rilasciano la CO₂ nell'atmosfera durante la respirazione. Un altro principale scambio di CO₂ si verifica tra gli oceani e l'atmosfera, infatti gli organismi marini utilizzano la CO₂ dissolta negli oceani durante la fotosintesi.

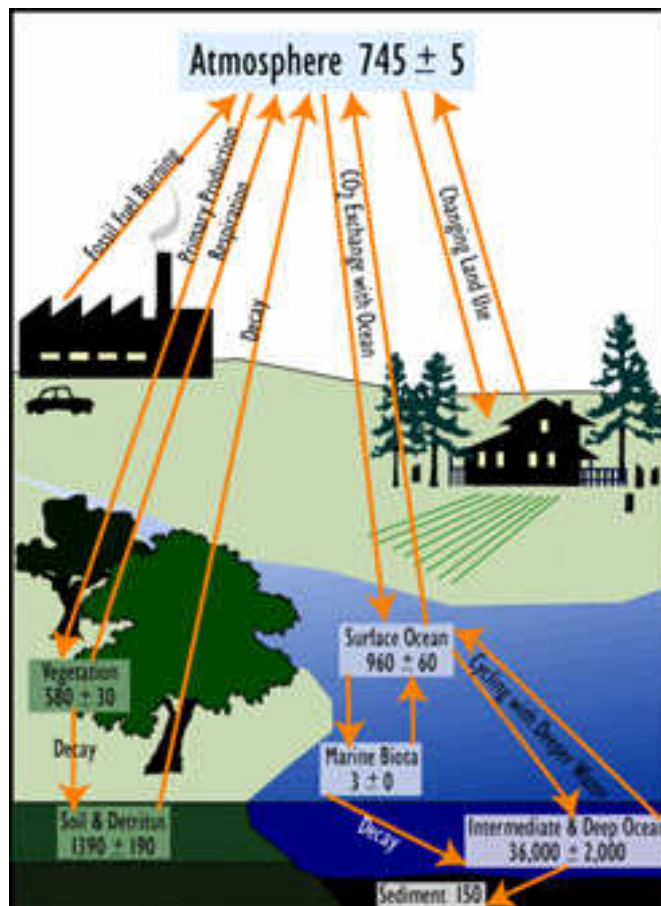


Fig. II.10: Ciclo del Carbonio

Due altri importanti processi derivanti dall'attività umana sono:

- la combustione di combustibili fossili;
- la variazione dell'utilizzo del territorio.

Carbone fossile, gas naturale, petrolio e suoi derivati sono 'bruciati' dalle industrie, dalle automobili e dalle centrali termoelettriche con produzione di CO₂; la variazione dell'utilizzo del territorio è un termine generico che indica un gran numero di attività umane tra cui, l'agricoltura, la deforestazione e la riforestazione etc..

La figura II.10 mostra il ciclo del carbonio con la relativa massa di carbonio, in gigatoni di carbonio (Gt C), in ogni magazzino e per ogni processo di scambio tra i vari magazzini. La quantità di carbonio che viene scambiata in ogni processo determina se lo specifico magazzino sta crescendo o è in diminuzione. Per esempio, l'oceano assorbe dall'atmosfera 2.5 Gt C in più di quanto non ne ceda all'atmosfera stessa, a parità di altri fattori, il magazzino oceanico cresce ad un ritmo di 2.5 Gt C per anno e il magazzino atmosferico decresce alla stessa velocità. Gli altri fattori però non sono uguali poiché la combustione fossile dovuta ad attività umane sta incrementando il magazzino atmosferico del carbonio di circa 6.1 Gt C all'anno e

l'atmosfera interagisce anche con la vegetazione ed il suolo. Inoltre vi è una variazione delle risorse territoriali (agricoltura intensiva, deforestazione etc.).

Le sfere che circondano la superficie terrestre (atmosfera, idrosfera, litosfera e biosfera) interagiscono fra loro e si comportano in modo simile ad un organismo vivente. Le interazioni di queste sfere con l'energia solare e con loro stesse risultano in cambiamenti che vengono indicati con i termini di tempo atmosferico e clima. Prima di raggiungere la superficie terrestre, la radiazione solare passa attraverso nuvole ed atmosfera, le quali riflettono, diffrangono, assorbono e trasmettono diverse quantità di energia, figura II.11. La superficie terrestre riflette parte della radiazione solare incidente ed assorbe la rimanente. Non appena la superficie terrestre assorbe questa energia, si riscalda e trasmette l'energia indietro nello spazio. Quando le velocità di assorbimento ed emissione sono uguali (Bilancio Radiativo) la temperatura terrestre è stabile. Se l'atmosfera non esistesse la superficie terrestre raggiungerebbe il Bilancio Radiativo ad una temperatura di 33 °C centigradi più fredda dell'attuale, cioè a circa 0 °C. Però alcuni gas nell'atmosfera assorbono parte dell'energia radiata dalla superficie. Essi ritrasmettono questa energia verso la superficie terrestre riscaldandola. In questo modo la presenza dell'atmosfera mantiene una temperatura maggiore della superficie terrestre. Questo processo è chiamato effetto serra. Il termine serra è utilizzato per descrivere questo fenomeno poiché i gas si comportano esattamente come i vetri di una serra per intrappolare calore e mantenere una temperatura più alta all'interno di essa. I gas atmosferici maggiormente responsabili dell'effetto serra sono il vapor acqueo (H_2O), l'anidride carbonica (CO_2) di cui ci occuperemo, metano (CH_4), ossido d'azoto (N_2O) ed ozono (O_3). Se tale effetto non fosse presente la vita sulla terra non sarebbe possibile.

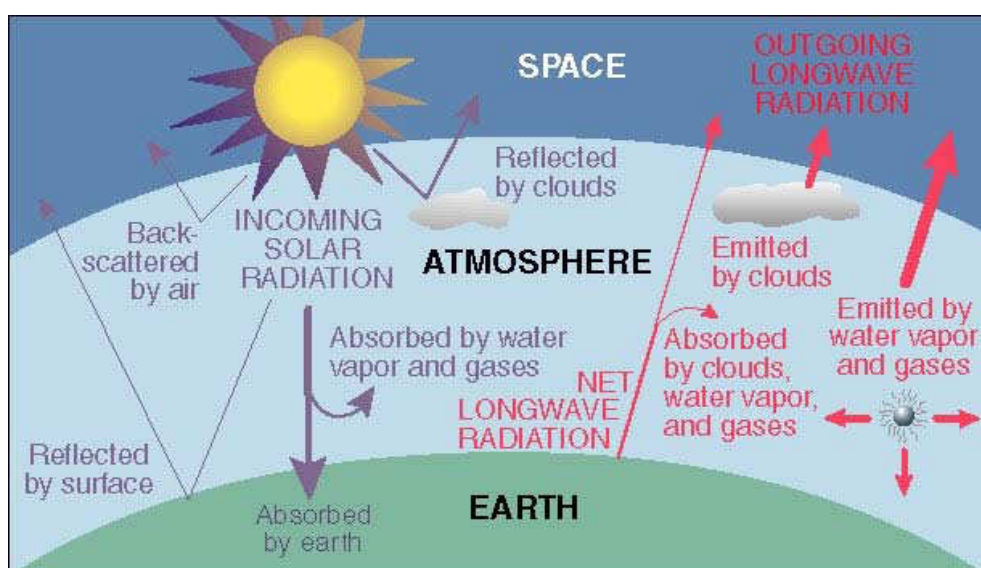


Fig. II.11: Il meccanismo dell'effetto serra

Sin dall'inizio della rivoluzione industriale circa 200 anni fa, la concentrazione atmosferica di gas serra, anidride carbonica, metano e ossido d'azoto è aumentata sensibilmente. Questi incrementi sono imputabili a diverse attività umane quali la produzione e l'uso di combustibili fossili insieme ad altre attività industriali ed agricole.

L'anidride carbonica prodotta naturalmente è soggetta ad un ciclo stagionale figura 2.12; La CO_2 atmosferica è assorbita dalle piante durante la stagione di crescita in quanto entra a far parte della fotosintesi e viene rilasciata attraverso la respirazione in tutto l'arco dell'anno. Questi scambi tendono ad equilibrarsi nel periodo di un anno. Tale ciclo è la causa principale delle notevoli oscillazioni stagionali.

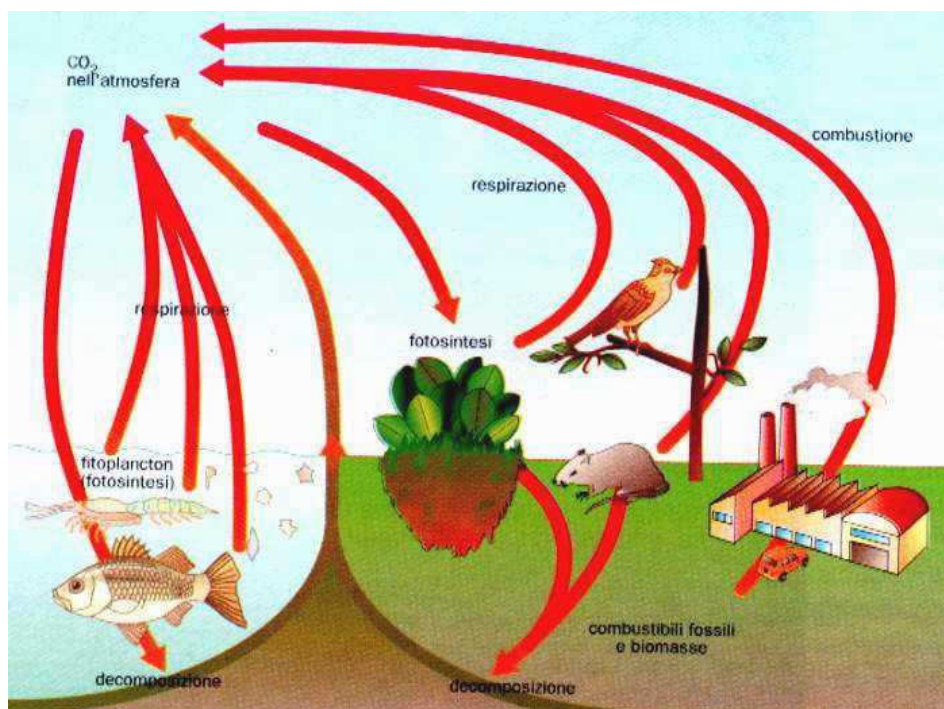


Fig. 2.12: Meccanismo naturale e da combustibili della CO_2

Le attività umane perturbano il ciclo del carbonio naturale, infatti sin dall'epoca della rivoluzione industriale la concentrazione di CO_2 atmosferica è cresciuta di circa il 30%. Poiché la CO_2 non è chimicamente attiva, le emissioni terrestri (incendi, processi industriali, gas di scarico di automobili etc.) tendono ad accumularsi nell'atmosfera, vengono immagazzinate negli oceani (la CO_2 è in grado di sciogliersi parzialmente in acqua) o immagazzinate nella biosfera terrestre (terreno/vegetazione).

Il ciclo geochimico dei carbonati (figura II.13) e dei silicati che opera su una scala di tempo superiore ai 500.000 anni è illustrato dallo schema seguente. Un aumento di temperatura attiverà una più intensa piovosità; si avranno piogge acide per acido carbonico, che attiveranno una più intensa azione solvente sulle rocce

carbonatiche già esistenti e di idrolisi dei minerali delle rocce silicatiche affioranti in tutti i continenti, con formazione di ingenti quantità di bicarbonato di calcio solubile e di silice disciolta trasportati in soluzione dalle acque dei fiumi negli oceani.

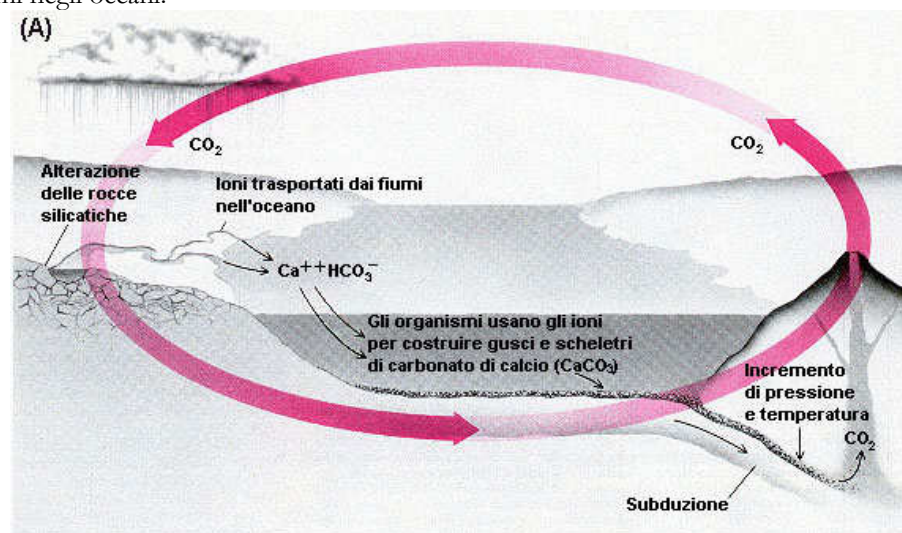
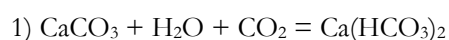


Fig. II.13: Ciclo geochimico della CO₂

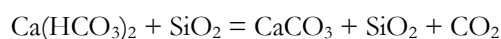
Indicando per semplicità i silicati calcici con la formula generica CaSiO₃, avremo le seguenti reazioni:



Gran parte dell'anidride carbonica in eccesso finisce così in mare sotto forma di bicarbonato, che gli organismi marini utilizzeranno per costruire i loro gusci e scheletri carbonatici, destinati a venire incorporati nei sedimenti alla loro morte:



Pertanto nel corso della precipitazione chimica e soprattutto biochimica in mare viene nuovamente liberata, per intero, l'anidride carbonica utilizzata per la soluzione delle rocce carbonatiche sui continenti, per cui, in definitiva, in questo caso si tratterebbe solo di un trasferimento di CO₂ dall'atmosfera agli oceani. Viene invece restituita solo la metà di quella utilizzata per l'idrolisi dei silicati calcici: l'altra metà viene incorporata nei carbonati che si formano in mare nella reazione che fa seguito alla 2):



Si parte infatti da due molecole di CO₂ iniziali (vedi formula 2), e se ne riottiene una sola. Un abbassamento di temperatura invece rallenta la sottrazione di CO₂ dall'atmosfera e quindi tenderà a far aumentare l'effetto serra. I carbonati depositatisi sui fondali marini potranno, una volta inglobati nelle zone di subduzione, liberarsi se sottoposti a forte pressione e alta temperatura attraverso eruzioni vulcaniche riportando la CO₂ nell'atmosfera.

Al ciclo della CO_2 partecipano anche gli organismi secondo lo schema seguente, attraverso i processi di respirazione, fotosintesi, processi di accumulo di sostanza organica derivante da organismi sotto forma di petrolio e carbone.

L'importanza dell'utilizzo dei biocombustibili è legata al fatto che la CO_2 prodotta attraverso la combustione può essere totalmente riassorbita dalle piante, proprio per il fatto che si inserirebbe all'interno di quel ciclo stagionale di CO_2 prodotta naturalmente.

L'unico problema di tali combustibili è legato all'occasionale non completa rinnovabilità. Il biodiesel è rinnovabile al 100% solo quando l'alcool usato nella reazione di transesterificazione è anch'esso rinnovabile, ma questa percentuale si riduce al 90% (se il bilancio è fatto in termini di massa) o 95% (se il bilancio è fatto in termini di massa di carbonio) quando si usa un alcool di origine fossile come ad esempio il metanolo. Questo alto grado di rinnovabilità giustifica il fatto che le direttive europee non considerino i biodiesel in termini di emissioni di CO_2 . In verità dovrebbe essere preso in considerazione il ciclo globale della CO_2 per poter valutare l'impatto del biodiesel sull'effetto serra e tale calcolo è molto più complesso di quello che si possa pensare. Vi sono grosse discrepanze tra i risultati delle analisi well-to-wheel effettuate da numerosi studiosi, tuttavia portano comunque ad un migliore bilancio di emissioni di CO_2 tra il 50 e l'80% rispetto al gasolio tradizionale. Questo fa sì che l'utilizzo di biodiesel sia la prima strada da percorrere per diminuire le emissioni nel settore dei trasporti, che come confermato nel protocollo di Kyoto, risulta essere responsabile del 23% delle emissioni serra globali.

II.7. Cenni sulle normative sulle emissioni inquinanti dei motori Diesel.

Le normative in materia ambientale sono diventate, negli ultimi dieci anni, sempre più stringenti. Oggi, i nuovi motori Diesel hanno emissioni di inquinanti ridotte di oltre il 90% rispetto a quindici anni fa.

Il motore Diesel, che dal punto di vista termodinamico è il motore a combustione interna più efficiente, ha lo svantaggio di non poter ancora fare affidamento sui sistemi catalitici trivalenti ormai largamente utilizzati per i motori ad accensione comandata. Si rende quindi necessario un notevole impegno nella ricerca e nello sviluppo di soluzioni tecniche e di tecnologie in grado di abbattere drasticamente le emissioni di inquinanti alla fonte, ovvero in camera di combustione. Si sono sviluppate alcune tecnologie finalizzate al controllo integrato delle quantità di combustibile e dell'aria, intesa come carica del processo di combustione. Ciò consente di guardare al futuro del Diesel con ottimismo perché questo rimane il propulsore che offre i migliori vantaggi in termini di consumi di combustibile (e di conseguenza il minor impatto nei confronti dell'effetto serra).

Gli inquinanti regolamentati sono gli HC, il CO, gli NO_x ed il particolato. Nel tempo le normative sulle emissioni di tali specie inquinanti si sono evolute, riducendo in maniera sempre più drastica i limiti consentiti per legge, imponendo notevoli restrizioni anche ai motori Heavy Duty.

Le normative di riferimento, che si sono susseguite negli anni sono mostrate in tabella II.9. Dove vengono riportati i valori delle emissioni gassose dalle autovetture espressi in g/km.

NORMATIVA	massa di ossido di carbonio (CO)		massa di Idrocarburi (HC)		massa di ossido di azoto (NO _x)		massa combinata di HC e NO _x (HC + NO _x)		massa di Particolato (PM)
	benzina	diesel	benzina	diesel	benzina	diesel	benzina	diesel	diesel
Direttiva 91/441 - 1992 (Euro 1)	2,72	2,72	---	---	---	---	0,97	0,97	0,14
Direttiva 94/12 - 1996 (Euro 2)	2,20	1,00	---	---	---	---	0,50	0,70	0,08
Direttiva 98/69 A - 2000 (Euro 3)	2,30	0,64	0,20	---	0,15	0,50	---	0,56	0,05
Direttiva 98/69 B - 2005 (Euro 4)	1,00	0,50	0,10	---	0,08	0,25	---	0,30	0,025
Regolamento 715/2007 – 2011 (Euro 5)	1,00	0,50	0,10	---	0,06	0,18	---	0,23	0,005
Regolamento 715/2007 – 2015 (Euro 6)	1,00	0,50	0,10	---	0,06	0,08	---	0,17	0,005

Tab.II.9: Emissioni gassose autovetture (valori in g/ km)

Dalla tabella precedente si nota una riduzione media di circa il 90% delle emissioni dalla normativa EURO1 alla EURO4, e ancor di più per la EURO5. Per quanto riguarda i motori Diesel, gli inquinanti sui quali si concentra la maggiore attenzione sono gli ossidi di azoto NO_x ed il particolato, in quanto le altre specie chimiche regolamentate (CO ed HC) sono emesse in quantità ridotte grazie all'eccesso d'aria con il quale lavora il motore Diesel.

La figura II.16 mostra graficamente il target, ovverosia il rispetto di EURO6, che ci si propone di raggiungere in termini di NO_x e particolato.

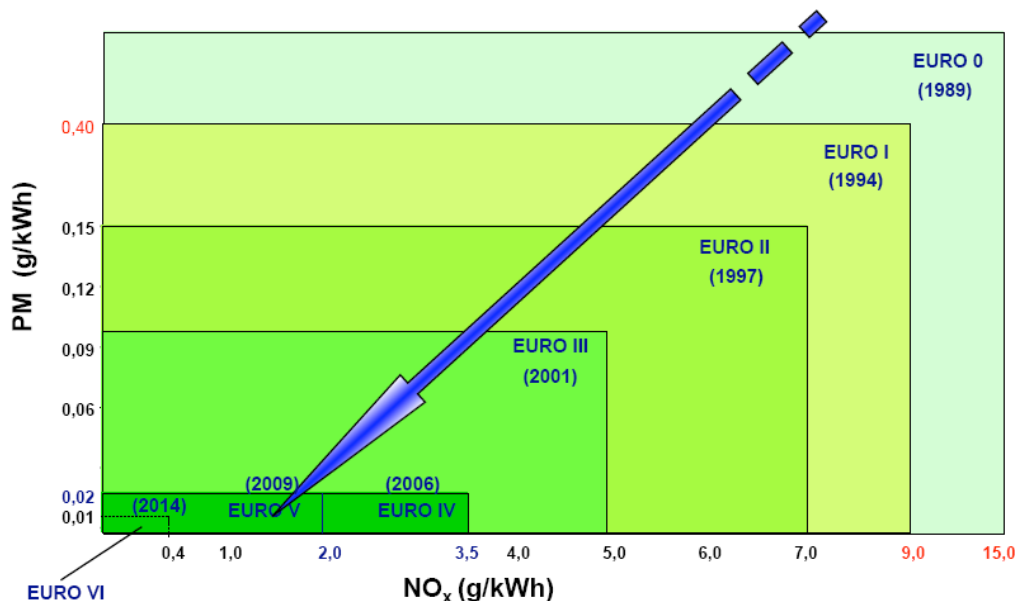


Fig. II.16 Evoluzione delle normative da Euro0 a Euro6 (la quale rappresenta il target della normativa emissioni)

Proposte sui limiti di emissione di Euro5 ed Euro6

L'allegato I del regolamento (CE) n. 715/2007 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 20 giugno 2007 , relativo all'omologazione dei veicoli a motore riguardo alle emissioni dai veicoli passeggeri e commerciali leggeri (Euro 5 ed Euro 6) fissa i limiti di emissione per ogni categoria di emissioni inquinanti e per i diversi tipi di veicoli citati in precedenza.

Norma Euro 5

Le emissioni prodotte da veicoli diesel:

- ✓ monossido di carbonio: 500 mg/km;
- ✓ particolato: 5 mg/km (ossia una riduzione dell'80% delle emissioni rispetto alla norma Euro 4);
- ✓ ossidi di azoto (NO_x): 180 mg/km (ossia una riduzione del 20% delle emissioni rispetto alla norma Euro 4);
- ✓ emissioni combinate di idrocarburi e di ossidi di azoto: 230 mg/km.

Emissioni prodotte da veicoli a benzina, a gas naturale o a GPL:

- ✓ monossido di carbonio: 1 000 mg/km;
- ✓ idrocarburi non metanici: 68 mg/km;
- ✓ idrocarburi totali: 100 mg/km;

- ✓ ossidi di azoto (NO_x): 60 mg/km (ossia una riduzione del 25% delle emissioni rispetto alla norma Euro 4);
- ✓ particolato (unicamente per i veicoli a benzina a iniezione diretta che funzionano a miscela magra): 5 mg/km (limite non previsto dalla norma Euro 4).

Per quanto riguarda i furgoni e altri veicoli commerciali leggeri destinati al trasporto merci della categoria N1, il regolamento prevede tre classi di limiti di emissione, in funzione della massa di riferimento del veicolo: inferiore a 1305 kg, tra 1305 kg e 1760 kg, superiore a 1760 kg. I limiti applicabili a quest'ultima classe sono validi anche per i veicoli destinati al trasporto merci della categoria N2.

Norma Euro 6

Con l'entrata in vigore della norma Euro 6 le emissioni di ossidi di azoto prodotte da veicoli a motore diesel dovranno essere ridotte in misura considerevole. Ad esempio, le emissioni prodotte dalle automobili e da altri veicoli destinati al trasporto non potranno superare il limite massimo di 80 mg/km (ossia una riduzione supplementare di più del 50% rispetto alla norma Euro 5). Le emissioni combinate di idrocarburi e di ossidi di azoto prodotte da veicoli diesel verranno anch'esse ridotte e non potranno superare un certo limite: ad esempio, per le automobili e altri veicoli destinati al trasporto il limite è fissato a 170 mg/km.

Applicazione delle norme

A decorrere dell'entrata in vigore delle norme Euro 5 ed Euro 6, gli Stati membri devono rifiutare il rilascio dell'omologazione, l'immatricolazione, la vendita e l'entrata in servizio dei veicoli che non rispettano i limiti di emissione prescritti. Una proroga di un anno è prevista per i veicoli destinati al trasporto merci (categoria N1, classi II e III, e categoria N2) e per i veicoli concepiti per rispondere a esigenze sociali specifiche. Il calendario è il seguente:

- ✓ la norma Euro 5 è applicabile dal 1° settembre 2009 per quanto riguarda il rilascio dell'omologazione e sarà applicabile a partire dal 1° gennaio 2011 per quanto riguarda l'immatricolazione e la vendita dei nuovi tipi di veicoli;
- ✓ la norma Euro 6 sarà applicabile a partire dal 1° settembre 2014 per quanto riguarda il rilascio dell'omologazione e dal 1° settembre 2015 per quanto riguarda l'immatricolazione e la vendita dei nuovi tipi di veicoli.

Incentivi finanziari, accordati dagli Stati membri e destinati ad incoraggiare il rispetto anticipato dei nuovi valori limite, sono autorizzati se:

- ✓ si applicano a tutti i veicoli nuovi in vendita sul mercato di uno Stato membro che siano conformi ai requisiti fissati dal presente regolamento;

- ✓ cessano di essere applicati alla data di applicazione dei valori limite;
- ✓ ammontano, per ogni tipo di veicolo a motore, ad un importo che non supera il costo supplementare dei dispositivi tecnici montati per soddisfare i limiti di emissione, compreso il costo di installazione.

Road Map per lo sviluppo ecosostenibile

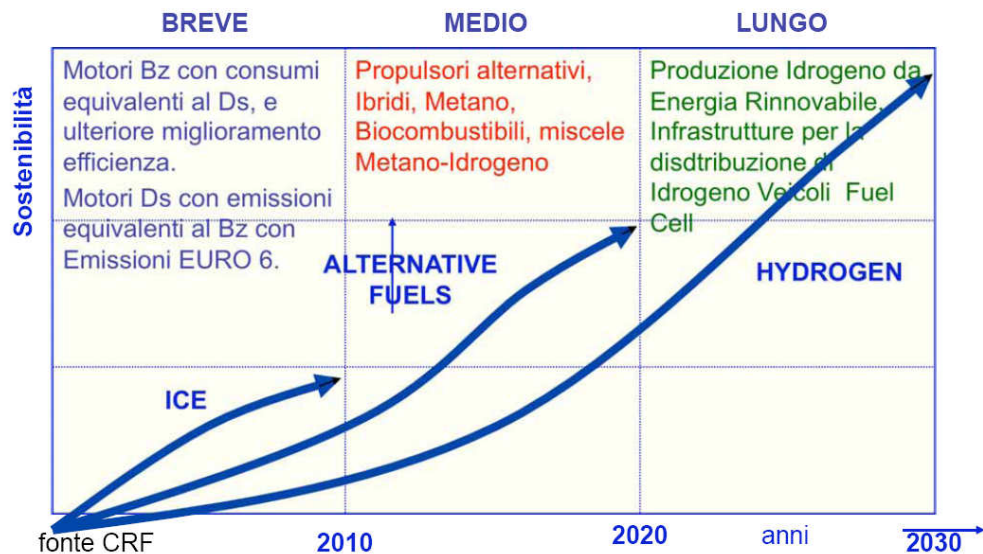


Fig. II.17: Road map per motori e combustibili

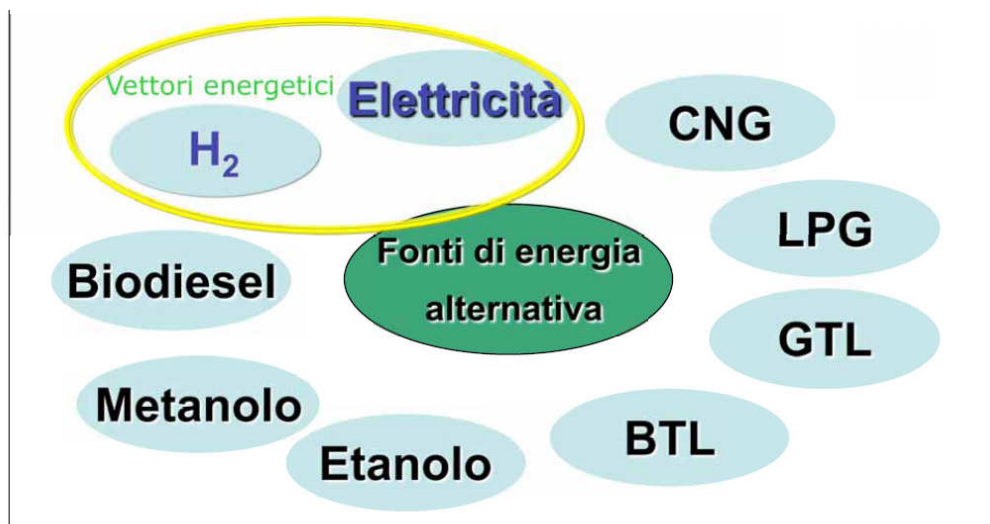


Fig. II.18: Road map per combustibili

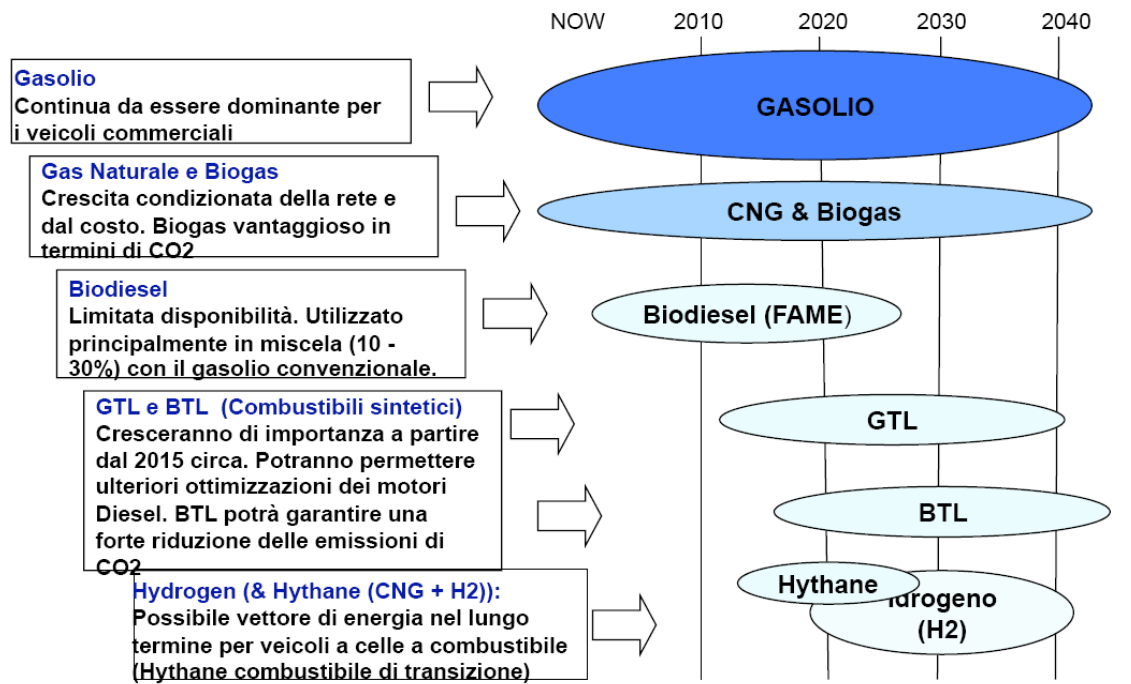


Fig. II.19: Road map per combustibili

Le figure mostrano chiaramente che la politica a sostegno di uno sviluppo sostenibile passa anche attraverso la scelta consapevole di utilizzare sempre più i combustibili alternativi, intensificando le ricerche e l'uso di tecnologie innovative per i motori destinati all'autotrazione.

Bibliografia

- [1] G. Ferrari, *Motori a Combustione Interna*, Ed. Il Capitello
- [2] R. della Volpe, M. Migliaccio, *Motori a combustione interna per autotrazione*, Liguori editore, 1995.
- [3] *Combustibili alternativi Caratteristiche, tecnologie, criteri di scelta e prospettive*, LandiRenzo Corporate University, ottobre 2007
- [4] Lapuerta M, Armas O, Rodriguez-Fernandez J. *Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions*. Progress in Energy and Combustion Science 34 (2008) 198–223.
- [5] Tat ME. *Investigation of oxides of nitrogen emissions from biodiesel-fueled engines*. Tesi di Dottorato 2003, Iowa State University.
- [6] Usta N. *An experimental study on performance and exhaust emissions of a diesel engine fuelled with tobacco seed oil methyl ester*. Energy Convers Manage 2005;46:2373–86.
- [7] Alam M, Song J, Acharya R, Boehman A, Miller K. *Combustion and emissions performance of low sulfur, ultra low sulfur and biodiesel blends in a DI diesel engine*. SAE paper 2004, 2004-01-3024.
- [8] Szybist JP, Boehman AL, Taylor JD, McCormick RL. *Evaluation of formulation strategies to eliminate the biodiesel NO_x effect*. Fuel Process Technol 2005;86:1109–26.
- [9] Boehman AL, Song J, Alam M. *Impact of biodiesel blending on diesel soot and the regeneration of particulate filters*. Energy Fuels 2005;19:1857–64.
- [10] Monyem A, Van Gerpen JH, Canakci M. *The effect of timing and oxidation on emissions from biodiesel-fueled engines*. Trans ASAE 2001;44(1):35–42.
- [11] Tat ME, Van Gerpen JH. *Measurement of biodiesel speed of sound and its impact on injection timing*. Nat Renew Energy Lab 2003 NREL/SR-510-31462.
- [12] Ramadhas AS, Muraleedharan C, Jayaraj S. *Performance and emission evaluation of a diesel engine fueled with methyl esters of rubber seed oil*. Renew Energy 2005;30:1789–800.
- [13] Assessment and Standards Division (Office of Transportation and Air Quality of the US Environmental Protection Agency). *A comprehensive analysis of biodiesel impacts on exhaust emissions*, 2002; EPA420-P-02-001.
- [14] Lapuerta M, Rodriguez-Fernandez J, Agudelo JR. *Diesel particulate emissions from used cooking oil biodiesel*. Bioresource Technol 2007.
- [15] Senatore A, Cardone M, Rocco V, Prati MV. *A comparative analysis of combustion process in D.I. Diesel engine fueled with biodiesel and diesel fuel*. SAE paper 2000, 2000-01-0691.

- [16] Canakci M, Van Gerpen JH. *Comparison of engine performance and emissions for petroleum diesel fuel, yellow grease biodiesel, and soybean oil biodiesel*. ASAE Annual international meeting 2001; 016050.
- [17] Canakci M. *Performance and emissions characteristics of biodiesel from soybean oil*. Proc I MECH E Part D J Automob Eng 2005; D7:915–22.
- [18] Haas MJ, Scott KM, Alleman TL, McCormick RL. *Engine performance of biodiesel fuel prepared from soybean soapstock: a high quality renewable fuel produced from a waste feedstock*. Energy Fuels 2001;15:1207–12.
- [19] Cardone M, Prati MV, Rocco V, Seggiani M, Senatore A, Vitolo S. *Brassica Carinata as an alternative oil crop for the production of biodiesel in Italy: engine performance and regulated and unregulated exhaust emissions*. Environ Sci Technol 2002;36(21):4656–62.
- [20] Graboski MS, McCormick RL. *Combustion of fat and vegetable oil derived fuels in diesel engines*. Progr Energy Combust Sci 1998;24:125–64.
- [21] Monyem A, Van Gerpen JH. *The effect of biodiesel oxidation on engine performance and emissions*. Biomass Bioenergy 2001; 20:317–25.
- [22] Yamane K, Ueta A, Shimamoto Y. *Influence of physical and chemical properties of biodiesel fuels on injection, combustion and exhaust emission characteristics in a direct injection compression ignition engine*. Int J Engine Res 2004;4:249–61.
- [23] Cheng AS, Upatnieks A, Mueller CJ. *Investigation of the impact of biodiesel fuelling on NO_x emissions using an optical direct injection diesel engine*. Int J Engine Res 2006; 7:297-318.
- [24] Nabi N, Akhter S, Mhia ZS. *Improvement of engine emissions with conventional diesel fuel and diesel–biodiesel blends*. Bioresource Technol 2006;97:372–8.
- [25] Staat F, Gateau P. *The effects of rapeseed oil methyl ester on diesel engine performance, exhaust emissions and long term behavior - a summary of three years of experimentation*. SAE paper 1995, 950053.
- [26] Alfuso S, Auriemma M, Police G, Prati MV. *The effect of methyl ester of rapeseed oil on combustion and emissions of DI engines*. SAE paper 1993, 932801.
- [27] Lapuerta M, Armas O, Ballesteros R. *Diesel particulate emissions from biofuels derived from Spanish vegetable oils*. SAE paper 2002, 2002-01-1657.
- [28] Wang WG, Lyons DW, Clark NN, Gautam M, Norton PM. *Emissions from nine heavy trucks fuelled by diesel and biodiesel blend without engine modification*. Environ Sci Technol 2000;34(6): 933–9.
- [29] Schmidt K, Van Gerpen JH. *The effect of biodiesel fuel composition on diesel combustion and emissions*. SAE paper 1996, 961086.

- [30] Chang DY, Van Gerpen JH. *Fuel properties and engine performance for biodiesel prepared from modified feedstocks*. SAE paper 1997, 971684.
- [31] F. Esposito, tesi di laurea: *Caratterizzazione di spray biodiesel e gasolio con elettroiniettori Common Rail Euro5*, Relatore A. Senatore (DiME-UniNa) Co-relatore Dr. L. Allocca, Istituto Motori C.N.R, 2010
- [32] regolamento (CE) n. 715/2007 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 20 giugno 2007, relativo all'omologazione dei veicoli a motore riguardo alle emissioni dai veicoli passeggeri e commerciali leggeri (Euro 5 ed Euro 6)
- [33] S. Carbonaro, *l'Europa al bivio trasporti sostenibili: una necessità*, presentazione alla mostra d'oltremare 18-19 ottobre 2009 OIL & NON OIL SUD, FederManager

CAPITOLO III

LA FISICA DELLO SPRAY

III.1. Introduzione

Si definisce spray una dispersione di goccioline liquide di dimensioni micrometriche prodotta meccanicamente e con una quantità di moto sufficiente a penetrare nel mezzo gassoso circostante.

Gli spray hanno da sempre avuto numerose applicazioni in molteplici campi, dal campo agricolo per l'irrigazione delle piantagioni contro l'attacco dei parassiti, al campo medico, dove la polverizzazione dei medicinali è utile alla salvaguardia della salute umana, come per gli aerosol, dal campo industriale, ad esempio per il rivestimento e la verniciatura, al campo motoristico dove la polverizzazione del combustibile favorisce la miscelazione aria-combustibile per la combustione nel cilindro.

Per quest'ultima applicazione, mentre in passato l'utilizzo che si faceva dei polverizzatori richiedeva semplicemente l'applicazione di un differente livello Δp di pressione tra monte e valle del foro, senza conoscerne in dettaglio le caratteristiche principali, oggi le crescenti e più sofisticate applicazioni richiedono uno studio più approfondito al fine di ottenere risultati più congrui alle specifiche esigenze. Tale studio deve essere volto alla caratterizzazione degli spray in termini di granulometria, densità, distribuzione di velocità e geometria, relazionandone, però, i risultati di volta in volta alle specifiche condizioni operative di temperatura e pressione dell'ambiente in cui i getti iniettano il combustibile.

Inoltre, se fino agli anni Ottanta, per i motori a combustione interna, le ricerche erano finalizzate ad ottimizzare il rendimento in termini di prestazioni e di consumo, negli ultimi vent'anni la ricerca motoristica ha subito l'influenza della politica di protezione ambientale. Limiti di emissioni sempre più stringenti obbligano il mondo industriale e di riflesso quello della ricerca, alla realizzazione di motori sempre meno inquinanti e lo studio dei parametri che influenzano lo spray e la sua evoluzione risulta di fondamentale importanza a tal fine.

Per garantire una buona miscelazione tra il combustibile ed il comburente, aumentandone la superficie di contatto e quindi di scambio termico con il raggiungimento di migliori condizioni per lo sviluppo della combustione, è necessario conoscere a fondo le modalità di formazione e sviluppo dello spray.

Una schematizzazione accurata degli spray deve tener conto, per quanto possibile, di tutti questi fenomeni perché da essa ci si possa aspettare risultati e previsioni attendibili.

Rivestono grande importanza il metodo di generazione della pressione a monte dello spray, per gli effetti che esso può avere sulla effettiva pressione a monte degli ugelli di fuoriuscita del fluido, la legge di iniezione e la portata istantanea attraverso i fori dell'ugello.

Diversi fattori e fenomeni influenzano lo sviluppo dello spray per la complessa interazione tra il liquido iniettato e l'aria circostante. Questi fattori possono essere così elencati:

- ✓ Condizioni fluidodinamiche d'iniezione, principalmente i livelli di turbolenza e cavitazione in seno al fluido, nonché la distribuzione dimensionale delle gocce iniettate;
- ✓ Break-up primario e secondario del getto liquido;
- ✓ Collisione e coalescenza tra le gocce;
- ✓ Evaporazione del combustibile;
- ✓ Interazione spray-parete (impingement).

Allo scopo di studiare le iniezioni nei motori a combustione interna sono state sviluppate numerose tecniche d'ispezione che consentono di ottenere risultati soddisfacenti; le difficoltà della sperimentazione sono legate, oltre che ai tempi estremamente ridotti (un'iniezione dura circa 1,0 ms e i fenomeni da studiare avvengono nell'arco di microsecondi), e alle dimensioni particolarmente ridotte delle goccioline nebulizzate (dell'ordine dei 10 μm), anche a difficoltà di carattere tecnico, considerando che tali iniezioni avvengono di norma in ambienti ostili, otticamente poco accessibili quali le camere di combustione.

III.2. Energia di atomizzazione.

L'energia teorica richiesta per realizzare una completa atomizzazione di un volume di liquido compatto di tensione superficiale σ in n gocce di diametro D_i , è data da:

$$E_{th} = \sigma \pi \sum_{i=1}^n D_i^2$$

Tale valore rappresenta però solo una piccola frazione, minore dell'1%, dell'energia che effettivamente dobbiamo cedere al fluido nella pratica. Possiamo dunque definire l'efficienza dell'atomizzazione come il rapporto tra l'energia minima teorica e quella effettivamente da cedere:

$$\eta_A = \frac{\sigma \pi \sum_{i=1}^N D_i^2}{\Delta_p \frac{\pi}{6} \sum_{i=1}^N D_i^3}$$

che in forma percentuale si esprime:

$$\eta_A (\%) = \frac{600 \cdot \sigma}{\Delta p \cdot D_{32}}$$

avendo definito il diametro medio di Sauter D_{32} come:

$$D_{32} = \frac{\sum_1^n D_i^3}{\sum_1^n D_i^2}$$

Tale grandezza, tipica per la caratterizzazione degli atomizzatori, rappresenta il diametro della particella sferica che ha lo stesso rapporto volume/superficie di quello medio dello spray; nella forma più generale si può esprimere come:

$$D_{32} = \frac{\int D_i^3 dn}{\int D_i^2 dn}$$

dove dn è il numero di particelle con diametro D_i nel range

$$D_i - \frac{dD_i}{2} < D < D_i + \frac{dD_i}{2}$$

III.3. Viscosità del fluido.

Studi condotti da Marshall nel 1954 hanno evidenziato come l'efficienza di atomizzazione che si ottiene per differenti fluidi sottoposti ad uno stesso Δp , varia in maniera anche molto vistosa in dipendenza dei valori della tensione superficiale e della viscosità.

Liquido	σ [dynes/cm]	Δp [bar]	D_{32} [μ m]	Viscosità[cSt]	η_A [%]
Olio	32	10,3	112	32	16
acqua	73	9,2	89	1,01	53

Tab. III.1: Confronto atomizzazione acqua-olio

Come si vede dalla tabella III.1, l'efficienza dell'atomizzazione che si realizza con l'acqua è di gran lunga superiore di quella che si può ottenere con un olio lubrificante sottoposto ad un Δp addirittura maggiore. Le ragioni di questa variazione sono da ricercarsi, oltre che nei diversi valori della tensione superficiale, che resta comunque un parametro fortemente caratterizzante, anche nella minore viscosità dell'acqua.

Per fluidi molto viscosi, per migliorare la nebulizzazione del getto si può ricorrere, infatti, all'espedito di riscaldare il fluido prima che raggiunga l'ugello, al fine di abbassare i valori della viscosità.

L'energia teorica rappresenta solo una piccola percentuale, circa l'1%, dell'energia totale richiesta, il 3% serve difatti a vincere le dissipazioni viscosse mentre il restante 96% si ritrova sotto forma di energia cinetica nelle gocce e nell'aria che le circonda all'uscita del nebulizzatore.

III.4. Densità dello spray.

Nello studio di uno spray un'altra grandezza da valutare è la sua densità ovvero il numero di particelle per unità di volume di una sfera presente nello spazio fisico delimitato dalle coordinate x e $x+dx$ con un raggio compreso tra r e $r+dr$, una velocità compresa tra v e $v+dv$ e una temperatura tra T e $T+dT$ all'istante t :

$$\text{densità} = \frac{\text{numero probabile di particelle}}{\text{volume occupato}} = f(x, r, v, T, t) dr dv dT$$

Poiché la temperatura della particella è assunta costante al suo interno e poiché le grandezze che definiscono la posizione e la velocità sono grandezze vettoriali, la f è una funzione di nove variabili indipendenti.

La frazione di volume θ occupata dal gas si calcola integrando il volume di liquido per tutte le differenti classi di particelle:

$$\theta = 1 - \int \left(\iiint \frac{4}{3} \pi r^3 f dr dv dT \right) \frac{dVol}{Vol}$$

Generalmente si assume per $\theta < 0,9$ la definizione di spray denso o “spesso” che corrisponde al caso in cui il volume di liquido è considerevolmente maggiore di quello occupato dal gas; in tali condizioni, che si verificano nei pressi dell'uscita del polverizzatore, lo studio delle equazioni di bilancio del flusso si complica notevolmente non potendo prescindere da fenomeni quali la collisione, e quindi il rimbalzo o la coalescenza, tra le particelle di fluido. Viceversa, nella regione in cui lo spray è molto “disperso”, ossia a grande distanza dall'ugello, la distanza tra le particelle consente di trascurare le mutue interazioni tra loro; l'analisi, in questo caso più semplice, ricorre alla più semplice modellazione del moto della singola particella.

In tale zona l'interazione tra il liquido iniettato e il gas dell'ambiente ricettore porta alla contemporanea atomizzazione ed evaporazione della parte liquida: le particelle liquide evaporano e via via si distanziano tra loro fino ad occupare una frazione molto ridotta del volume complessivo.

III.5. Le condizioni fluidodinamiche nell'iniettore.

La caratteristica del flusso che influenza in misura maggiore le modalità di dispersione del getto liquido è la velocità di efflusso del liquido a valle dell'ugello, nella sua effettiva distribuzione e nel livello di turbolenza interno al flusso nell'ugello stesso.

E' molto importante indagare su ciò che avviene nell'ugello identificando fin da principio la presenza di un flusso bifase. In particolare la presenza di cavitazione nell'ugello può incrementare sensibilmente la velocità d'iniezione poiché la sezione d'efflusso effettiva per il liquido è sensibilmente ridotta dalla presenza delle bolle di vapore; inoltre la successiva implosione delle medesime aumenta l'instabilità dello spray e va così a favorire i processi di break-up.

E' altresì importante caratterizzare il flusso che, ad esempio, in presenza di polverizzatori multiforo, attraversa ogni singolo ugello non limitandosi a considerazioni di simmetria nella generazione dello spray e a semplici argomentazioni che coinvolgano la portata volumetrica che attraversa i fori.

Numerosi studi sia numerici che sperimentali hanno evidenziato, infatti, che le condizioni a monte dei singoli ugelli di un polverizzatore sono diverse in considerazione della effettiva geometria dello stesso polverizzatore e della dinamica di comando del polverizzatore (geometria derivante da uso dei sistemi di lavorazione, da sue imperfezioni, da condizioni di flusso effettivamente differenti da foro a foro). La stessa varietà di soluzioni tecnologiche nella produzione di sistemi d'iniezione è altamente esplicativa dell'importanza che riveste il raggiungimento delle condizioni ideali per la produzione di spray controllati e ben conosciuti ai fini di una sempre migliore controllabilità della combustione e, in ultima analisi, dell'innalzamento delle prestazioni dei motori a combustione interna in termini di coppia e potenza massima, di consumi ed emissioni.

III.6. Il Break Up primario.

L'*atomizzazione* o *break-up primario* è il processo fisico di disintegrazione di un getto liquido in un elevato numero di goccioline e legamenti. Tale fenomeno è d'importanza cruciale nei sistemi di combustione, dove è richiesta una forte atomizzazione del combustibile affinché lo stesso possa evaporare ed interagire più facilmente con il comburente, migliorando le prestazioni del dispositivo e le sue emissioni inquinanti; queste ultime sono infatti fortemente influenzate dal rapporto tra i tempi di permanenza della carica nel dispositivo ed i tempi del processo di combustione, e tendono ad aumentare se i primi sono inferiori ai secondi.

Il *break-up primario* può essere suddiviso, a seconda delle cause che lo generano, in:

- ✓ Aerodynamic-induced break-up. L'atomizzazione è dovuta agli sforzi aerodinamici che agiscono sul getto a causa della velocità relativa tra questo ed il mezzo. La rottura del getto si ha quando tali forze riescono a vincere le forze di tensione superficiale, che tendono invece ad evitare il break-up per mantenere al minimo la superficie esterna.
- ✓ Turbulence-induced break-up. Quando nel foro dell'iniettore si hanno condizioni di moto turbolento pienamente sviluppato, la componente radiale della velocità causa delle perturbazioni e degli sfrangiamenti superficiali, seguiti dalla disintegrazione del getto. Questo meccanismo spiega l'atomizzazione che sperimentalmente si osserva anche quando si inietta in condizioni di vuoto spinto. Secondo questo modello, le fluttuazioni turbolente all'interno del liquido che emerge dall'ugello sono la causa delle perturbazioni superficiali iniziali.
- ✓ Cavitation-induced break-up. In presenza di cavitazione nei fori d'iniezione si hanno dei forti cambiamenti nella struttura dello spray. Poiché la pressione che circonda il getto emergente è molto più elevata della pressione all'interno delle bolle dovute alla cavitazione, queste tendono ad implodere e causano forti perturbazioni nello spray, che successivamente porteranno alla sua disintegrazione.
- ✓ In ogni caso i precedenti fenomeni sono contemporaneamente presenti, anche se con differenti intensità a seconda delle situazioni, ed insieme determinano la struttura del getto.

La dinamica e l'evaporazione delle particelle dello spray sono influenzate dal regime dello spray stesso. Dove la parte liquida dello spray rappresenta una frazione considerevole del volume occupato, lo spray si dice “spesso” o “denso” (questa regione si trova tipicamente nei pressi dell'uscita dal polverizzatore). Dove, invece, la parte liquida è altamente dispersa e, nonostante essa continui ad interagire con il gas ambiente ricevente quest'ultimo non subisce alterazioni considerevoli del suo stato fluidodinamico, lo spray viene detto “molto fine” o “molto sottile”. A grande distanza dall'ugello polverizzatore, l'interazione tra il gas dell'ambiente ricevente ed il liquido iniettato porta alla contemporanea evaporazione e atomizzazione della parte liquida: le particelle liquide evaporano e via via si distanziano tra loro fino a che la loro massa complessiva giunge ad occupare una frazione molto ridotta del volume interessato dall'intero spray. In queste condizioni è la massa di gas dell'ambiente ricevente ad occupare la maggior parte del volume occupato dal flusso bifase.

A tutte le condizioni intermedie comprese tra i due stadi estremi dei regimi di flusso, si dà il nome di spray “sottile” o “disperso” o “diluito”.

Quando lo stadio di spray “molto sottile” raggiunge le regioni più interne ad esso, l’evaporazione e il breakup provocano l’estinzione completa della parte liquida a vantaggio del vapore e la descrizione del flusso può essere perfettamente identica a quella di un flusso monofase. Complessivamente in queste condizioni la parte liquida non è in grado di influenzare le proprietà della parte gassosa.

III.6.1. I regimi di break up primario.

In dipendenza delle diverse combinazioni dei valori di forze d’inerzia della fase liquida, tensione superficiale, forze viscosi e aerodinamiche agenti sul getto liquido, si possono individuare quattro regimi di breakup primario:

- ✓ il regime di Rayleigh;
- ✓ il first wind induced breakup;
- ✓ il second wind induced breakup;
- ✓ il regime di atomizzazione completa;

Tale classificazione è stata introdotta da Reitz il quale, proseguendo gli studi iniziati da Ohnesorge, ha messo in relazione questi quattro regimi con i numeri adimensionali di Reynolds e dello stesso Ohnesorge. Allo stato delle ricerche la causa prima della disintegrazione del getto liquido e, perciò, dell’origine del flusso bifase si individua nella modalità di crescita delle onde di disturbo createsi sulla sua superficie per effetto dell’interazione tra il gas ed il flusso. L’esistenza delle onde di disturbo è chiaramente evidenziata con il ricorso all’analisi fotografica di getti a differente velocità iniziale.

L’evidenza sperimentale ha fornito le basi per la modellazione della fisica del break up: tra i diversi modelli di simulazione uno (il wave breakup model) cerca di simulare proprio la formazione di questi disturbi all’interfaccia liquido – gas, identificando le loro lunghezze d’onda e le velocità di crescita caratteristiche più probabili. Questa teoria presenta risultati attendibili e fornisce una descrizione sufficientemente completa dei meccanismi alla base dell’atomizzazione dei getti a bassa velocità, ma presenta i suoi limiti alle alte velocità. E’ sperimentalmente provato che, proprio in queste ultime condizioni, lo stato iniziale riveste l’importanza maggiore ai fini della modalità di atomizzazione. Ciò, in qualche modo, invita alla riflessione che non sia la generazione di perturbazioni ondose a poter descrivere in pieno le modalità di breakup.

La teoria, considerando le ipotesi semplificative di un getto liquido cilindrico che fuoriesce da un orifizio circolare penetrando in un mezzo gassoso incompressibile in quiete, conclude che esiste una velocità massima di crescita di queste perturbazioni che si presenta ad una particolare lunghezza d’onda. La coppia di valori di velocità e lunghezza d’onda descrive totalmente la perturbazione ondosa che, con la maggiore

probabilità, si propaga e cresce lungo la superficie di separazione tra liquido e gas rendendosi responsabile della disintegrazione del getto.

In dipendenza del valore di lunghezza d'onda predominante il getto si polverizza dando luogo a particelle di diametro maggiore o minore di quello del foro di produzione del getto stesso.

Per bassi valori del numero di Weber abbiamo il primo modo di disintegrazione del getto: la particella formatasi risulta avere diametro maggiore del diametro dello spray, siamo in *regime di Rayleigh* dove le influenze del gas circostante risultano trascurabili e si inizia ad avere breakup quando la lunghezza d'onda dei disturbi agenti sul getto è maggiore della circonferenza del getto stesso (Fig.III.2), il getto è influenzato dal campo gravitazionale e dalla tensione superficiale e non dalla resistenza opposta dall'aria circostante (tratto AC di Fig.III.1).

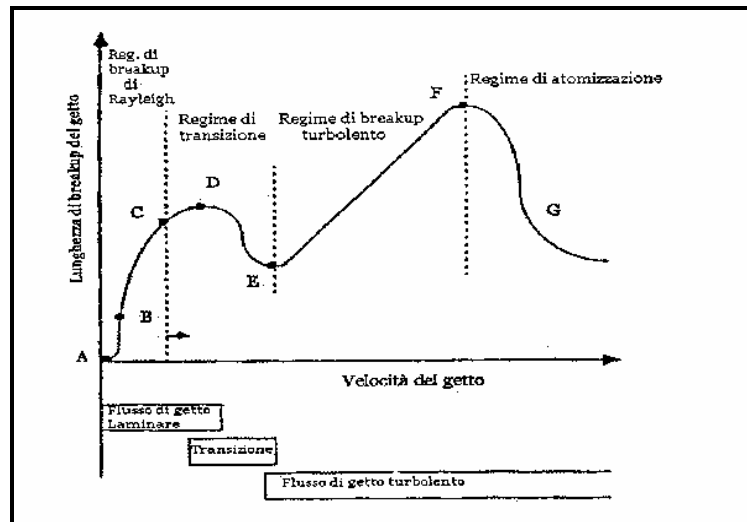


Fig. III.1: Andamento qualitativo della lunghezza di breakup in funzione della velocità del getto

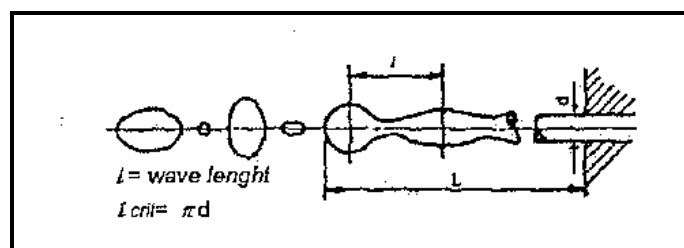


Fig. III.2: Rottura del getto a causa delle oscillazioni di lunghezza d'onda

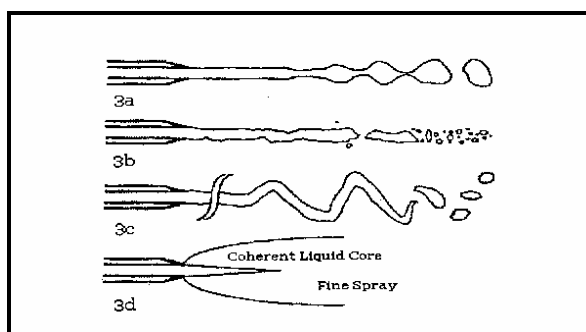


Fig. III.3: Breakup del getto nel: (a) regime di Rayleigh, (b) zona di transizione, (c) regime turbolento, (d) regime di atomizzazione

Nella fase transitoria di passaggio dal regime laminare al regime turbolento (tratto C-E) il breakup è influenzato sempre più dalla resistenza dell'aria che tende ad incrementare la deformazione della superficie del getto e a far ridurre la lunghezza d'onda dei disturbi al di sopra della quale si ha il breakup (Fig.III.3 b). Il valore della velocità di efflusso alla quale si verifica l'inversione della curva (punto D Fig.III.1) è funzione della viscosità del liquido. L'effetto delle forze di massa del gas circostante cresce al crescere del numero di Weber (o equivalentemente al crescere della velocità del getto). A questo regime, chiamato di *first wind-induced breakup*, il massimo tasso di crescita si ha per lunghezze d'onda progressivamente più corte, il che porta alla formazione di particelle grandi all'incirca quanto il diametro del getto.

Nei regimi turbolenti (tratto E-F Fig.III.1) la presenza di una componente radiale di velocità nel getto provoca la distruzione del getto stesso. L'azione della resistenza dell'aria tende ad amplificare ulteriormente le oscillazioni del getto determinando lo sviluppo di onde instabili trasversali e asimmetriche (Fig.III.3c). L'incremento del numero di Reynolds (Re) comporta, inoltre, l'insorgere della instabilità di Kelvin-Helmoltz e la rottura della superficie del getto. Siamo in regime di *second wind-induced breakup* nel quale il breakup si attribuisce alla crescita instabile di onde corte che originano particelle di diametro molto più piccolo del diametro del getto.

A destra del punto F (Fig.III.1) si ha la cosiddetta *spray region* nella quale il processo di atomizzazione inizia immediatamente a valle del foro d'uscita del getto che risulta costituito da un core liquido e una nube di goccioline che lo circonda. (Fig.III.3d). La lunghezza di breakup si riduce ma è ancora visibile una porzione liquida continua del getto.

Il regime di completa atomizzazione, corrispondente a numeri di Weber molto alti, è certamente quello di maggior interesse per lo studio dei getti prodotti dai sistemi di iniezione delle camere di combustione dato che in questo caso il breakup ha origine nelle immediate vicinanze dell'orifizio del pulverizzatore con la produzione di particelle estremamente minute.

Per flussi cavitanti all'interno dell'ugello, invece, la causa che determina la disintegrazione del getto è individuabile nel collasso delle bolle di cavitazione che vengono fuori dall'ugello trascinate dalla corrente liquida. Quando le bolle di cavitazione raggiungono la periferia dello spray esse generano l'onda perturbatrice che avvia la atomizzazione.

Tra i diversi modelli di simulazione, il *wave breakup model* cerca di simulare la formazione e lo sviluppo delle onde di disturbo che si creano sulla superficie del getto per effetto dell'interazione con il gas circostante.

Tale modello, se risulta molto attendibile per getti a bassa velocità, presenta dei limiti evidenti se invece consideriamo getti veloci che rappresentano, tra l'altro, la maggioranza dei casi di interesse scientifico.

IV.7. Il break up secondario.

Le gocce formatesi durante la disintegrazione del getto liquido possono ulteriormente suddividersi in esemplari più piccoli muovendosi nel gas. A causa della velocità relativa tra il gas e le gocce, sulle stesse agisce un campo di pressione non uniforme che tende a deformarle; quando l'entità della deformazione ha superato un livello critico la goccia si frantuma ulteriormente.

Il break-up secondario è un fenomeno molto complesso ed è determinato dall'equilibrio tra le forze viscose, d'inerzia e di tensione superficiale. Le analisi sperimentali mostrano che vi sono sei modi fondamentali di break-up secondario, a seconda del valore del numero di Weber We :

1. **Modo vibrazionale.** La disintegrazione è causata dall'amplificazione della deformazione della particella originata dalla risonanza vibrazionale della superficie del liquido ($We < 12$);
2. **Parachute regime.** Si ha una frammentazione preceduta dalla formazione di un "paracadute" di forma toroidale. Questo tipo di break-up è iniziato dalla disintegrazione del film esterno in una moltitudine di piccolissime goccioline, seguito dalla frattura del cuore liquido dello spray con formazione di gocce sensibilmente più grandi ($12 < We < 16$);
3. **Bag regime.** Il break-up della particella è dovuto alla deformazione della medesima in una struttura simile ad una bolla che si disintegra dopo aver raggiunto un valore critico di deformazione.

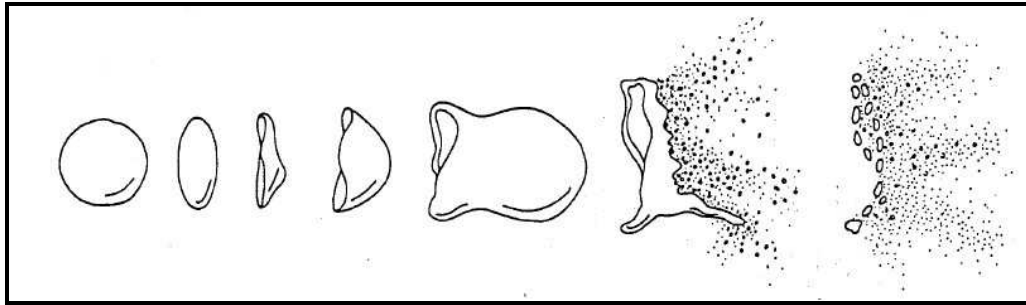


Fig. III.4: Regime di rottura "Bag" ($16 < We < 45$)

4. **Chaotic regime.** È un regime di transizione in cui la goccia si frantuma a causa sia della rottura della bolla, analogamente al caso precedente, sia degli squarci impressi ai filamenti esterni per effetto dell'azione frenante dell'aria circostante ($45 < We < 100$).
5. **Stripping regime.** Si ha, in seguito all'interazione con il fluido, lo strappo continuo della superficie esterna delle gocce in una serie di filamenti. Anche in questo caso la goccia si disintegra in più goccioline quando è stato superato un livello critico di deformazione.

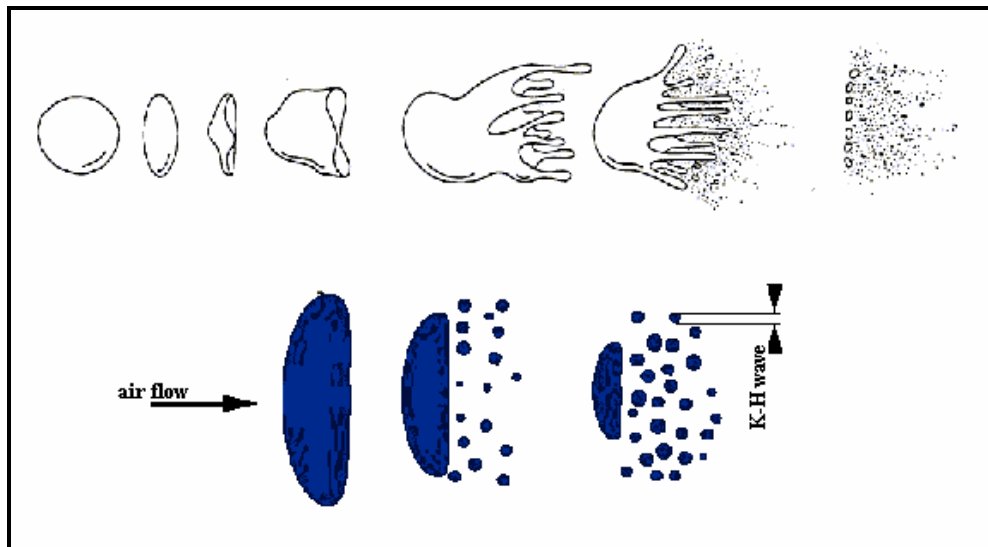


Fig. III.5: Regime di rottura "Stripping" ($100 < We < 1000$)

6. **Catastrophic regime.** È una frammentazione esplosiva che si osserva tipicamente ad alti numeri di Weber ed in presenza di onde d'urto sufficientemente forti. In questi casi, quando il fluido colpisce la goccia, non si osservano deformazioni e strappi, ma la goccia iniziale si frantuma improvvisamente.

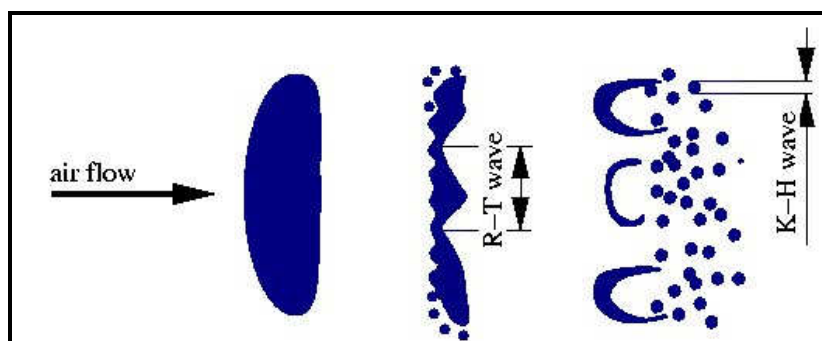


Fig. III.6: Regime di rottura Catastrofico ($We > 1000$)

IV.8. Le dimensioni delle particelle.

Diversi studi hanno evidenziato come la distribuzione delle dimensioni delle particelle fluide iniettate sia molto dispersa e non rispecchi in alcun modo nessuna distribuzione statistica nota.

L'unico dato certo è che le particelle che fanno parte della periferia dello spray sono quelle che per prime sono fuoriuscite dal polverizzatore e che hanno subito per prime l'impatto con l'aria. Per questo motivo la distribuzione radiale delle dimensioni delle particelle è ben individuata e riconosciuta essere con particelle più grosse sull'asse dello spray e più piccole, perché già parzialmente polverizzate, in periferia. Ciò è confermato dal fatto che l'autoaccensione dei motori diesel viene osservata sulla periferia dello spray, dove si realizza un migliore mescolamento con l'aria che penetra tra le particelle ormai diventate in gran parte vapore. La reazione di autoaccensione avviene nel punto in cui si raggiunge la proporzione stechiometrica in condizioni di temperatura adeguate.

La distribuzione dimensionale delle particelle in direzione assiale è meno complessa, essendo le particelle più lontane dall'ugello polverizzatore più contenute rispetto a quelle nelle vicinanze di esso. La causa di ciò risiede nel fatto che le particelle più lontane hanno già subito l'interazione distruttiva con il gas dell'ambiente ricettore.

E' difficile prevedere quali siano le distanze dall'ugello polverizzatore alle quali questi fenomeni siano evidenti ed in quale stadio dello sviluppo di uno spray intermittente. Sono, infatti, in gioco i fenomeni di scia che consentono alle particelle iniettate in un secondo tempo di trovare condizioni favorevoli alla loro penetrazione nel mezzo gassoso ricettore e, quindi, raggiungere le particelle iniettate in precedenza. Questo effetto di più moderata interazione tra le particelle iniettate più tardi con il gas dell'ambiente ricettore provoca anche un più facile mantenimento delle loro condizioni di forma (più bassa velocità relativa tra aria e liquido significa una più facile conservazione nel tempo e nello spazio della dimensione originaria delle particelle).

III.9. Collisione delle particelle.

La collisione si verifica in diverse applicazioni ed è tipica degli spray diesel come conseguenza della forte compattezza del getto. Essa è causata principalmente dalle diverse velocità delle singole gocce. Tali differenze derivano principalmente da:

- ✓ **interazione tra gocce di diverse correnti.** Questa situazione è tipica della zona d'impatto, dove le gocce dello spray principale si incontrano con quelle *post-impingement*, che si muovono nella direzione opposta;
- ✓ **differente interazione con il campo cinetico del mezzo di gocce di diverse dimensioni.** Le gocce più grandi hanno una maggiore inerzia e sono pertanto rallentate con più difficoltà dalle forze aerodinamiche; pertanto, a parità di velocità d'iniezione, possono impattare contro gocce più piccole precedentemente iniettate. Inoltre i *blobs* (macro-gocce di diametro pari al diametro del foro d'iniezione) iniettati in istanti successivi risentono di una forma di effetto scia, poiché la loro interazione con il mezzo è ridotta dalle gocce che li precedono;
- ✓ **diverse velocità all'interno del periodo d'iniezione.** Tali fenomeni possono verificarsi, specie se la linea d'iniezione è piuttosto lunga e le pressioni elevate, a causa delle onde di pressione che possono propagarsi nei condotti.
- ✓ Non esistono ancora delle teorie adeguate per la descrizione della collisione. Osservazioni sperimentali evidenziano come, a seconda delle proprietà inerziali e di moto relativo delle particelle e delle caratteristiche dei fluidi coinvolti, si hanno diverse tipologie di collisione che vanno dalla coalescenza al rimbalzo:
- ✓ **bouncing collision.** Le gocce rimbalzano semplicemente via l'una dall'altra;



Fig. III.7: collisione e rimbalzo tra due particelle

- ✓ **grazing collision.** Le gocce rimbalzano ma il contatto tra le superfici è impedito dall'intervento di un film di vapore;
- ✓ **permanent coalescence.** Le gocce coalescono e rimangono perennemente unite; ciò comporta una diminuzione del numero delle gocce;



Fig. III.8: coalescenza permanente tra due gocce

- ✓ **transition regime.** Le gocce inizialmente coalescono, ma successivamente si ha la loro separazione con formazione di gocce satelliti;
- ✓ **shattering collision.** Ad elevata energia d'impatto, dalla periferia delle gocce interagenti sono espulse radialmente delle piccole gocce figlie;

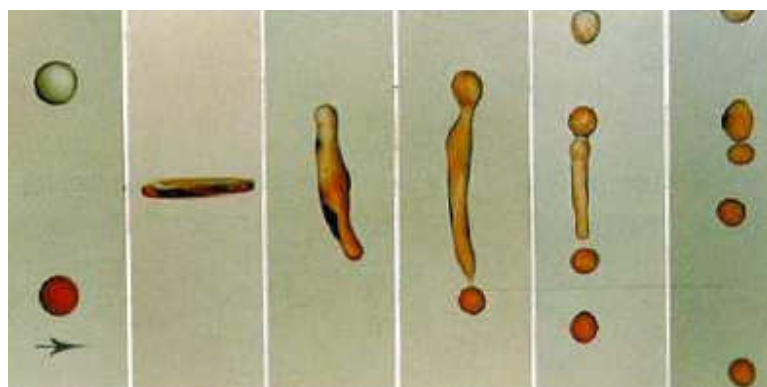


Fig. III.9: meccanismo di collisione e rottura in più gocce

Il tipo di collisione dipende essenzialmente dalla dimensione, velocità e momento angolare delle gocce e dalle proprietà fisiche del liquido e del mezzo.

III.10. Evaporazione e combustione del gasolio.

Sia nel caso di iniezione diretta che in quello di iniezione indiretta, in cui il gasolio viene iniettato in una precamera, si ha una sostanziale somiglianza del modo in cui avviene l'accensione del combustibile.

In entrambi i casi il gasolio, venuto a contatto con la massa d'aria calda, riceve calore da essa ed inizia a evaporare. Il vapore, solo in presenza del quale è possibile la combustione, mescolato con l'aria circostante, raggiunte le condizioni di autoaccensione, innesca la combustione. Ovviamente le particelle che seguono le prime, trovandosi direttamente in contatto con il gasolio già acceso, sono facilitate nel raggiungere le condizioni di autoaccensione, per cui bruciano di combustione di diffusione.

Da queste considerazioni segue la possibilità di prevedere, in maniera quasi puntuale, la localizzazione spaziale e temporale della prima accensione al fine di ottenere una graduale e completa combustione capace di ridurre i residui indesiderati come prodotto della combustione stessa.

Risulta altresì evidente come sia importante garantire la più completa vaporizzazione del gasolio in camera di combustione da cui segue la necessità di realizzare una nebulizzazione il più spinta possibile essendo la minore dimensione delle gocce un parametro che accelera l'evaporazione. Si osserva infatti come nei motori diesel la combustione inizi sempre alla periferia dello spray là dove l'atomizzazione è più spinta e maggiore è la presenza d'aria.

L'evaporazione delle gocce di combustibile in un motore coinvolge simultaneamente processi di scambio termico e massico nei quali il calore per l'evaporazione è trasferito alla superficie della goccia, per conduzione, convezione ed irraggiamento, dai gas caldi circostanti, mentre i vapori del combustibile diffondono all'interno della corrente gassosa. La velocità complessiva d'evaporazione dipende da:

- ✓ pressione, temperatura e proprietà di trasporto del mezzo;
- ✓ temperatura, dimensioni e volatilità delle gocce nello spray;
- ✓ velocità relativa tra le gocce ed il mezzo.

Quando inizia lo scambio termico le gocce si riscaldano e contemporaneamente perdono parte della loro massa per evaporazione e diffusione nel mezzo circostante. Le velocità di tali fenomeni di trasporto sono fortemente influenzate dal numero di Reynolds delle gocce.

La modellazione matematica di tale fenomeno è estremamente complessa e gravosa da un punto di vista computazionale, poiché sarebbe necessario tener conto della non stazionarietà dei processi di scambio termico, nonché dell'influenza sui medesimi della distorsione delle gocce, del loro campo termico interno e dei fenomeni diffusivi tra i diversi componenti del combustibile. Al contrario la quasi totalità dei modelli d'evaporazione disponibili trascura tali fenomeni e suppone sferiche le gocce e quasi stazionario lo scambio termico.

III.11. L'interazione tra spray e pareti solide.

La possibilità che uno spray di combustibile vada ad impattare contro la superficie della camera di combustione dipende principalmente da tre caratteristiche:

1. **geometria e dimensioni della camera di combustione.** L'impatto dello spray sulle pareti della camera di combustione, in particolare contro il cielo dello stantuffo, appare essere inevitabile nei motori a combustione interna veloci di piccolo alesaggio, a causa della ridotta distanza tra l'iniettore e le pareti medesime;
2. **pressione d'iniezione.** Elevate pressioni d'iniezione, aumentano la penetrazione dello spray, che ha così una maggiore possibilità d'impattare prima di accendersi;

3. **temperatura in camera di combustione.** Le alte temperature che tipicamente si hanno in un motore a combustione interna accelerano l'evaporazione del combustibile, riducendo così la massa della fase liquida e limitando l'impatto.

In un motore a combustione interna ad accensione per compressione destinato alla trazione leggera si hanno piccoli alesaggi ed elevate pressioni d'iniezione e temperature nel cilindro. I primi due effetti sono però nettamente preponderanti e danno luogo ad elevate probabilità di urto: studi hanno mostrato che in un motore a combustione interna Diesel di piccolo alesaggio (85 mm), in condizioni di carico elevato, più del 50% del combustibile iniettato va ad impattare sul cielo del pistone; da osservare come l'impatto sia più frequente nelle fasi d'avvio del motore, dove anche la bassa temperatura favorisce la penetrazione della fase liquida.

Il fatto che il combustibile ancora allo stadio liquido raggiunga le pareti solide della camera di combustione risulta molto influente sulle quantità di inquinanti presenti nei gas di scarico dei motori ad accensione spontanea. Non è ancora del tutto esplicito quale sia l'effetto dell'impingement sulla presenza di specie inquinanti, in particolare di idrocarburi incombusti, a seguito della combustione ed ancora non vi è accordo sulla bontà o meno dei suoi effetti. Alcuni progettisti cercano di incrementare tale fenomeno, mentre altri cercano di limitarlo. Essi si propongono di sfruttare l'atomizzazione post-impatto, che accelera l'evaporazione ed agevola la miscelazione del combustibile con l'aria anche grazie al vortice che si viene a creare nel campo di moto dell'aria intorno allo spray che aumenta il "gas entrainment" nella zona d'impatto; tali effetti sono sicuramente benefici per una corretta combustione, particolarmente nei motori Diesel dove molto ridotti sono i tempi tra l'iniezione e l'accensione della carica.

Chi conduce indagini sull'interazione tra lo spray e le pareti solide si cimenta con geometrie complesse delle camere di combustione. Il problema della comprensione della correlazione tra le geometrie complesse e gli effetti dell'impingement sul livello di inquinanti nei gas di scarico ha portato ad avvicinarsi al problema per gradi. Ogni singola modalità di interazione tra flusso bifase e parete solida di geometria semplice è stata analizzata con il risultato di correlare i diversi comportamenti dello spray alle singole condizioni geometriche. E' allora possibile in questo modo attribuire alla presenza delle singole geometrie la causa di determinati comportamenti. I dati sperimentali ottenuti in questo modo hanno fornito un data-base per una simulazione basata su di una ampia casistica fenomenologica. È tuttavia da osservare che dal punto di vista sperimentale è estremamente difficile ottenere informazioni dettagliate del fenomeno attraverso indagini condotte direttamente su motori; pertanto la quasi totalità dell'attuale conoscenza proviene da studi dello spray ottenuti con esperimenti condotti in condizioni statiche di pressione e temperatura.

III.11.1 Fenomeno di wall impingement.

La descrizione del fenomeno del *wall-impingement*, da un punto di vista fisico-teorico, è estremamente difficoltosa a causa della forte complessità dei fenomeni coinvolti e della loro difficile identificazione. Molti studi sono stati dedicati all'argomento negli ultimi decenni per la sua importanza in diversi settori, dai sistemi di combustione alle lavorazioni meccaniche ed all'erosione dei terreni a causa della pioggia. Sfortunatamente la maggior parte di tali studi sono relativi all'impatto di singole gocce (*single-drop impingement*), ma negli ultimi anni la messa a punto di nuove tecniche ottiche sperimentali sta permettendo una più efficace caratterizzazione anche dell'urto di gruppi di gocce (*multi-drop impingement*).

I principali fenomeni fisici che il fenomeno dell'impatto coinvolge sono lo sviluppo dello spray (*wall spray*) e l'evoluzione della pellicola liquida (*wall film*) di combustibile su parete. I processi sono totalmente accoppiati e possono influenzare notevolmente l'efficienza della combustione e le emissioni inquinanti. Il *wall spray*, contenendo gocce risultanti dalla deviazione tramite flusso gassoso, dal rimbalzo e dallo *splash*, può intensificare il riscaldamento e la vaporizzazione dello spray per due ragioni principali:

1. la frantumazione delle gocce incidenti provoca un sensibile aumento dell'area della superficie esterna complessiva dello spray;
2. i vortici che si generano nel gas in prossimità della parete favoriscono una migliore dispersione del *wall spray*.

D'altra parte il *wall film*, provenendo dalla deposizione del combustibile, può avere effetti negativi quali un aumento della formazione del particolato e delle emissioni di idrocarburi incombusti, particolarmente nelle partenze a freddo e nei transitori; si è osservato un sensibile aumento dei livelli di fumo nelle partenze a freddo, a causa dell'accumulo di carburante sulle pareti della camera di combustione.

Per comprendere quali siano gli effetti dell'interazione tra la singola particella e le pareti è necessario conoscere le forze che ne governano il moto e che ne causano la deformazione per effetto prima dell'interazione con il fluido dell'ambiente ricettore e poi dell'urto contro la parete solida. Quando la particella si approssima alla parete nel punto di contatto, le forze di inerzia sono preponderanti rispetto a tutte le altre. Il motivo di ciò è che la particella assume una forma nettamente diversa da quella che aveva in precedenza dato che nel punto, o nei punti di contatto, la pressione che agisce sulla sua superficie aumenta repentinamente. In seguito il livello di pressione raggiunto si attenua nuovamente per effetto della formazione di un film sottile sulla superficie solida, il quale finisce con il coinvolgere una più grande massa di fluido all'innalzamento di pressione e, quindi, con il ridurre il picco di pressione a valori più contenuti. Le forze che dopo la prima interazione agiscono sul film liquido sono quelle di adesione alla superficie

solida, pressione di contatto e sforzo tangenziale indotto dall'attrito con la superficie, forze di lungo range (dovute alla presenza di un sottilissimo film di liquido nelle vicinanze del punto di contatto) e forze indotte dal campo termico imposto al film dalle differenze di temperatura tra la parete ed il film stesso.

Il moto risultante della particella dipende dal fatto che si consideri stabile o meno il flusso di liquido che ne deriva: nel caso lo si consideri stabile, la risoluzione delle equazioni del moto porta al rimbalzo della particella se l'energia cinetica incidente è più alta della somma delle energie dovute agli effetti dissipativi e all'energia dovuta alle forze di adesione della particella alla parete; se si ipotizza, invece, che il flusso sia instabile, la risoluzione delle equazioni del moto porta alla disintegrazione della particella con la formazione sia di particelle più piccole che rimbalzano sia di un sottile film aderente alla parete solida. Le fonti di maggiore instabilità sono riconducibili alla elevata energia di impatto, alla rugosità della superficie solida, alla presenza di un gradiente di temperatura all'interno della particella dovuto alla presenza di pareti calde ed all'eventuale formazione di bolle di vapore nella pellicola liquida.

I fattori determinanti del processo di impingement sono quindi identificabili nelle proprietà del fluido (viscosità, densità, tensione superficiale) e nelle condizioni della parete solida, quali la sua rugosità superficiale, la sua temperatura e la presenza di un film liquido sottile. I parametri adimensionali che riassumono questi effetti sono il *numero di Reynolds* ($Re = \rho v_n \frac{D}{\mu}$, che esprime il rapporto tra le forze di

inerzia e le forze di attrito viscoso, dove v_n è la componente normale della velocità d'impatto), il *numero di Weber* ($We = \rho v_n^2 \frac{D}{\sigma}$ che esprime il rapporto tra le forze dovute all'impatto, che tendono a disintegrare la

particella e le forze di tensione superficiale che tendono, al contrario, a limitare, a parità di volume, la superficie esterna della goccia e quindi ad evitare la frantumazione della medesima), il *numero di Ohnesorge* (Oh) o, equivalentemente, il *numero di Laplace* ($La = \frac{1}{Oh^2} = \frac{We}{Re^2} = \frac{\mu^2}{\sigma \rho D}$) che rappresenta l'importanza

relativa tra la tensione superficiale e le forze viscosi agenti su di una superficie, la rugosità superficiale relativamente alle dimensioni della particella e lo spessore del film di liquido presente sulla superficie solida rispetto alla temperatura della parete e alle dimensioni della particella.

Gli studi sull'argomento riferiscono che ogni singolo parametro gioca un ruolo preciso nell'interazione tra particella e superficie solida.

- ✓ La **pressione di contatto** al momento dell'impatto è proporzionale alla densità del liquido. Per questo la densità contribuisce fortemente al processo di disintegrazione della particella.

- ✓ La **tensione superficiale** si oppone alla disintegrazione della particella e porta alla riduzione della superficie a parità di volume: per questo la tensione superficiale gioca un ruolo opposto a quello della densità del fluido.
- ✓ La **viscosità del liquido** fa aumentare la dissipazione di energia durante gli stadi di elevata deformazione della particella e contrasta l'insorgere di fenomeni di instabilità sul film liquido; l'effetto è quello di ritardare la disintegrazione della particella.
- ✓ Il **diametro della particella** porta con sé l'informazione sul volume occupato da essa e quindi sulla massa che a sua volta determina la quantità di energia cinetica d'impatto posseduta dalla particella. Diametri crescenti hanno l'effetto di ridurre la pressione di picco raggiunta durante l'impatto, poiché una dimensione maggiore della goccia avvicina di fatto la superficie libera della stessa al film liquido presente sulla parete in prossimità del punto di impatto.
- ✓ La **velocità di incidenza** della particella influenza direttamente la sua deformazione ed il flusso radiale di liquido che si determina a seguito dell'impatto, dal momento che la pressione di picco raggiunta durante l'interazione è direttamente proporzionale all'energia cinetica posseduta nella direzione perpendicolare alla parete; una particella che urti contro una superficie solida può rimanervi semplicemente attaccata, può deformarsi o disintegrarsi su di essa in dipendenza della sua velocità di impatto; in più il rapporto tra il diametro della particella e la componente della velocità normale alla superficie è un parametro importantissimo per quanto riguarda la durata dell'interazione.
- ✓ **L'angolo d'incidenza** tra la goccia e la superficie influenza il regime d'impatto, perché la componente tangenziale della velocità tende ad accentuare l'instabilità del film liquido e quindi a favorire la frammentazione della corona liquida che si forma in seguito all'urto.
- ✓ La **rugosità superficiale**, relativamente al diametro della goccia impattante, influenza le modalità di interazione tra particella e parete nel senso che una su una parete liscia la particella si limita a deformarsi, mentre in presenza di una superficie rugosa tende a disintegrarsi; in più le caratteristiche di rugosità della superficie giocano un ruolo determinante nei confronti delle dimensioni delle particelle generatesi per effetto della disintegrazione di quella originaria; la presenza di una superficie rugosa, inoltre, varia la componente di velocità normale puntuale; quest'ultimo effetto è ovviamente predominante quando le dimensioni della particella sono piccole rispetto alla rugosità della superficie; infine una rugosità accentuata consente uno scambio termico più agevole tra la superficie solida e la particella.

- ✓ La **curvatura della superficie** può alterare la velocità di deformazione della particella, ma in maniera abbastanza limitata se le dimensioni delle gocce non sono comparabili con quelle del raggio di curvatura della superficie.
- ✓ La **temperatura della parete** influenza il regime idrodinamico della particella. Precedenti studi hanno identificato in particolari livelli di temperatura i criteri per distinguere i diversi regimi. Le temperature importanti sono la temperatura di ebollizione del combustibile T_B , la temperatura di pura adesione del liquido T_{PA} , la temperatura di massima velocità di evaporazione T_N (temperatura di Nakayama), tipica del regime di *nucleate boiling*, la temperatura di puro rimbalzo T_{PR} e la temperatura di minima velocità di evaporazione T_{Leid} (temperatura di Leidenfrost), caratteristica del regime di *film boiling*. I regimi di scambio termico che si stabiliscono in funzione di queste temperature, secondo alcuni studi, stabiliscono direttamente il regime idrodinamico della particella liquida. Essi sono tipicamente così suddivisi, vedi Fig.III.10:
 - evaporazione del film (tratto a-b);
 - vaporizzazione – ebollizione (tratto b-c);
 - transizione (tratto c-d);
 - evaporazione sferoidale (tratto d-e).

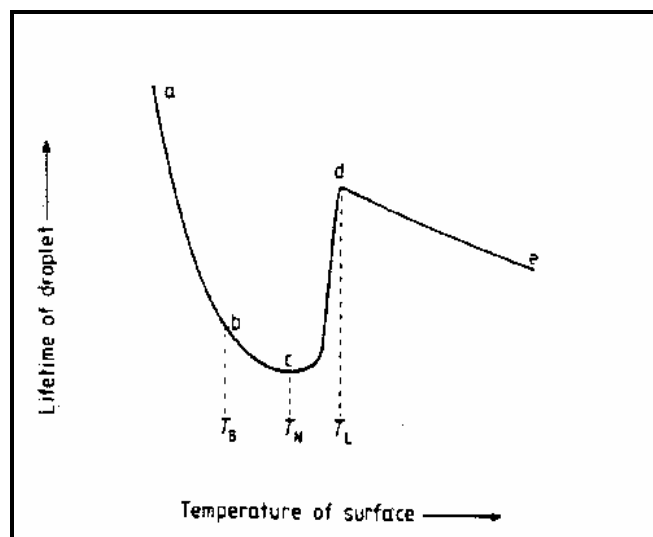


Fig. III.10: Curva della vita di una goccia liquida in funzione della temperatura della superficie di impatto

Nei primi due il liquido è in contatto diretto con la superficie e il regime viene indicato come *wetting regime*, cioè come regime in cui si riconosce solo che la superficie si bagna. Durante questo regime, al momento dell'impatto in prossimità della temperatura di ebollizione del liquido si forma una struttura cellulare di

bolle che coalescono dopo che anelli di bollicine si erano formati all'interno della particella stessa. Nel regime di transizione il liquido è solo in alcuni punti a diretto contatto con la superficie solida, mentre per il resto lo separa da essa un sottile strato di vapore formatosi per vaporizzazione della parte di liquido più vicina alla superficie. A queste temperature si nota la presenza di numerose bolle di vapore che enucleano sulla superficie di contatto liquido-solido e che, se dotate di sufficiente forza per staccarsi dalla superficie, riescono a coalescere e ad interrompere parzialmente il contatto liquido-solido. Nel regime di evaporazione sferoidale il liquido è completamente separato dalla parete solida per mezzo di uno strato di vapore. Questo viene indicato, in analogia col primo, come *non wetting regime*. In questo caso non c'è più contatto diretto tra liquido e solido. Per queste temperature la forma raggiunta dalla particella risulta simile a quella relativa alle temperature più basse in special modo nei primi stadi del contatto.

Per le applicazioni dello spray diesel i regimi che occorrono più di frequente sono i primi due dato che la temperatura caratteristica dell'ultimo regime idrodinamico, per il gasolio, risulta molto alta.

Da tutti gli studi sull'argomento si deduce che la profondità dello strato di liquido presente sotto forma di film sulla parete solida colpita dallo spray influenza il numero e lo spettro dimensionale delle particelle che si creano per effetto della disintegrazione della particella madre. Alcuni studi concludono che quanto maggiore è la profondità dello strato di film liquido tanto più basso risulta il numero di particelle che si originano dalla disintegrazione della particella madre, mentre altri informano su di un cambiamento netto delle modalità di deformazione a seguito dell'urto su di un film più sottile o più spesso.

Quando avviene uno *splashing* della particella sopra una parete ricoperta da un film sottile, il liquido dello stesso entra a far parte delle particelle figlie provocando una distribuzione dimensionale differente, a volte bimodale.

I diversi regimi idrodinamici che caratterizzano uno spray che impatta contro una parete solida possono essere classificati come segue (vedi Fig.III.11):

- ✓ **attaccamento (a):** la particella rimane attaccata alla superficie conservando pressoché intatta la sua forma sferica. In questo caso l'energia di impatto è molto ridotta e la temperatura della parete è al di sotto della temperatura di adesione. In questo regime le dinamiche dei regimi di superficie bagnata sono importanti ed il flusso è governato dal numero di Laplace;
- ✓ **rimbalzo (b):** questo regime si differenzia dagli altri perché dopo il contatto la particella rimbalza indietro. Questo fenomeno può essere osservato se si verificano alternativamente due casi: se il contatto diretto tra liquido e parete viene impedito dalla presenza di un sottile film di vapore che si interpone oppure se, in presenza di una parete bagnata, l'energia di impatto è

bassa e l'aria intrappolata tra il film liquido e la particella causa un consumo di energia che si manifesta alla fine in un rimbalzo;

- ✓ **deformazione, allargamento, spreading (c):** questo regime è caratterizzato dal fatto che la goccia si deforma considerevolmente fino a spalmarsi sulla parete a mo' di film. In questo caso i parametri caratteristici del fenomeno sono l'angolo di incidenza, la velocità di deformazione ed il massimo diametro raggiunto dal film liquido risultante dall'impatto contro la parete;
- ✓ **breakup indotto dalla ebollizione (d):** la disintegrazione della particella avviene anche in presenza di basse velocità di impatto per la subitanea sollecitazione indotta dalla temperatura della parete che fa raggiungere alla particella stessa la temperatura di massima velocità di evaporazione;
- ✓ **rimbalzo con breakup (e):** si differenzia dal precedente per il fatto che, oltre al rimbalzo, si registra una disintegrazione della particella in goccioline più piccole;
- ✓ **breakup termico (f):** questo regime si caratterizza per la formazione di un film liquido dovuto alla deformazione della particella che impatta contro la superficie e alla disintegrazione dovuta al regime termico indotto dalla temperatura della parete stessa che frantuma in maniera casuale il film appena formatosi;
- ✓ **splash (g):** questo regime vede la particella deformarsi profondamente formando un film di liquido per poi frantumarsi nella periferia di esso in un grande numero di frammenti. Si ha tipicamente per elevate energie d'impatto ed elevati valori di We .

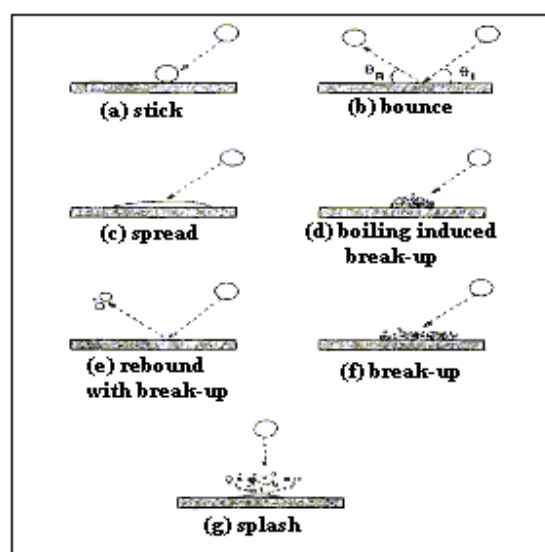


Fig. III.11: Schema dei diversi regimi di impatto

Una delle difficoltà maggiori nella simulazione numerica dei fenomeni connessi all'impingement delle particelle liquide si ha nella definizione di un parametro che permetta una netta separazione di questi regimi idrodinamici. I modelli di simulazione devono fare i conti con l'interazione tra le particelle e le dimensioni diverse delle particelle dopo l'urto. In molti studi il parametro scelto per la caratterizzazione del regime idrodinamico è il numero di Weber, che per valori superiori a 40 è associato al regime di solo attaccamento della particella alla parete, per valori molto inferiori a 40 al rimbalzo senza breakup, per valori inferiori a 40, ma superiori a questi ultimi al rimbalzo di particelle più piccole.

Un'influenza sensibile sulle caratteristiche dello spray post-impingement è esercitata dal successivo impatto di altre gocce (multi-drop impingement). È stato infatti osservato che l'impatto successivo di più gocce è in grado di aumentare l'instabilità del film liquido, causa principale dello *splash*; in pratica, a parità di regime termico del film e di numero di Weber delle particelle impattanti, il multi-drop impingement è in grado di causare uno splash laddove una singola goccia non vi riuscirebbe.

III.12 Parametri geometrici dello spray.

Un getto di combustibile viene caratterizzato determinandone le sue caratteristiche geometriche macroscopiche, quali la penetrazione L_g , l'angolo di cono θ_g e l'inclinazione β_g data dalla costruzione dell'ugello (Fig.III.12), oltre alle sue caratteristiche fisiche, quali densità, diametro e velocità delle gocce e loro vaporizzazione.

Penetrazione: è la misura del segmento che unisce lungo l'asse del getto il foro di uscita con la punta estrema del getto quando esso è iniettato in aria quiescente. Essa è regolata dall'intensità relativa di due azioni opposte: (1) quella riguardante l'energia cinetica del getto liquido iniziale, dipendente dalla pressione di iniezione, dalla densità del combustibile e dalla geometria dei fori di iniezione, e (2), quella relativa alla resistenza aerodinamica esercitata dall'aria circostante presente in camera di combustione, dipendente dalla velocità relativa tra il getto stesso e l'aria, dalla superficie della sezione frontale del getto e dalla densità dell'aria. La velocità iniziale del getto, dipendente dalla pressione di iniezione e dalla densità del combustibile, oltre che da fattori fluidodinamici che alterano il valore della velocità teoricamente raggiungibile, è in genere alta, ma al crescere della polverizzazione e, quindi, al crescere della superficie di contatto dello spray con l'aria, diminuisce gradualmente a causa del fatto che l'energia cinetica del liquido è man mano dissipata in attrito. Quando le goccioline di combustibile hanno esaurito tutta la loro energia cinetica, la loro successiva traiettoria è imposta principalmente dalla gravità e dal movimento dell'aria

circostante. In generale, uno spray compatto e stretto avrà un'alta penetrazione, mentre uno spray ben atomizzato e ad ampio angolo di cono, incontrando una maggiore resistenza dell'aria, tenderà ad avere una bassa penetrazione.

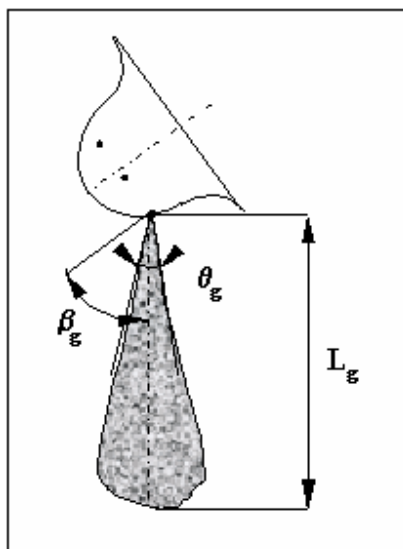


Fig. III.12: Parametri geometrici dello spray

La penetrazione è di fondamentale importanza, infatti essa, e la velocità del getto in camera di combustione, determinano le condizioni di miscelazione dell'aria con il combustibile. In alcune camere di combustione ad alta turbolenza, l'interazione del getto con le superfici calde è ben accetta. Il deposito di combustibile sulle pareti calde lo sottrae momentaneamente alla fase di combustione riducendo i gradienti di pressione, inducendo quindi, un funzionamento meno ruvido. In altre camere, come quelle ad iniezione diretta, il fenomeno dell'*impingement* aumenta notevolmente il livello delle emissioni. Una penetrazione insufficiente potrebbe essere poi responsabile di un funzionamento "fumoso". Infatti, considerando che la miscela pronta a bruciare in un motore Diesel è molto eterogenea, essendo essa formata da una sospensione di goccioline di combustibile in seno all'aria, se si va ad esaminare la situazione in prossimità di ogni gocciolina, si troverà una nube formata da aria e vapori di combustibile con concentrazione di quest'ultimo via via decrescente all'allontanarsi dalla goccia di liquido. È probabile, quindi, che con una penetrazione insufficiente non si abbia un'efficiente polverizzazione del combustibile con conseguente raggiungimento, in corrispondenza delle zone dove sono in sospensione le goccioline, di un valore dell'indice d'aria λ pari a $0,3 \div 0,4$, per cui il combustibile crackizza facilmente senza poter bruciare efficacemente, con la conseguente produzione di fumo allo scarico.

Studi condotti da Hiroyasu sui getti dimostrano che la penetrazione dipende principalmente da: pressione di iniezione, geometria del polverizzatore, densità e temperatura del gas in camera. Studi condotti invece da J. B. Heywood evidenziano che la legge di penetrazione è divisa in due fasi: una prima dipendente linearmente dal tempo e una seconda dalla sua radice quadrata. Inoltre si dimostra che il break-up primario è governato dalla pressione di iniezione.

Angolo di Cono: esso è definito come l'angolo formato da due semirette tracciate dall'orifizio di scarico alla periferia esterna dello spray ad una distanza pari a 60 volte il diametro del foro dalla faccia dell'atomizzatore.

Esso fornisce informazioni sulla penetrazione lungo la direzione ortogonale all'asse del getto. Insieme alla penetrazione definisce il grado di utilizzazione della camera. Tale parametro geometrico dipende fortemente dalla densità e viscosità dell'ambiente nonché dal disegno dell'ugello. Infatti, numerose esperienze hanno mostrato che, a parità di geometria dell'ugello e di pressione di iniezione, al crescere della densità del combustibile, l'angolo di cono aumenta, ed aumenta pure, a parità di geometria dell'ugello e densità del combustibile, al crescere della pressione di iniezione. Per quanto riguarda la viscosità, si è visto che, a parità di geometria dell'ugello e di pressione di iniezione, il suo aumento genera una riduzione dell'angolo di cono. Infine, a parità di pressione di iniezione, l'angolo di cono aumenta al diminuire del diametro dei canali di ammissione dell'iniettore e al crescere del diametro dei fori. Infine, è da ricordare che la tensione superficiale non ha influenza sull'angolo di cono.

L'inclinazione: è un parametro imposto dal costruttore. Un'inclinazione diversa da zero, induce dei vortici *squish* o *swirl* di diversa entità a seconda dell'angolo, come conseguenza del trasferimento della quantità di moto dal combustibile al fluido in camera.

Lo studio completo della fisica dello *spray* è di tipo instazionario, pertanto la caratterizzazione non può prescindere dalla variabilità con il tempo di talune grandezze.

III.13 Camere di combustione di tipo quiescente

Nelle camere tipo quiescente il campo di moto dell'aria presente è di piccola entità rispetto a quello del combustibile. In tale situazione l'iniezione avviene direttamente in camera e la formazione della miscela si ha sfruttando l'energia cinetica del getto che fuoriesce dall'iniettore. Per effetto dello scambio della quantità di moto tra le particelle di combustibile e quelle di aria, nella camera verrà indotto, ad opera dal getto, un campo moto. La dinamica degli eventi è la seguente:

- ✓ all'inizio dell'iniezione il liquido penetra nella carica di aria quiescente, si atomizza, allontanandosi dall'ugello e diminuendo progressivamente la sua velocità. Lo spray nel suo percorso si miscela con l'aria che è d'ostacolo al moto, l'aria penetra nel getto e contribuisce all'azione distruttiva tra i filetti fluidi generati dal break up primario;
- ✓ il processo di cui al punto precedente prosegue con la formazione di un *"puff"* alla testa dello spray. Il fluido che arriva alla camera incontra meno resistenza lungo il suo tragitto, ragione per la quale raggiungerà le particelle di fluido che lo hanno preceduto nella fuoriuscita spingendole (cedendo quantità di moto) verso l'esterno del campo fluido generando così la diffusione laterale del combustibile. Il *tip* (punta) dello spray sarà quello sottoposto alla massima resistenza aerodinamica;
- ✓ il getto continua ad evolvere fino alla condizione di equilibrio, situazione nella quale le particelle della punta del getto risultano avere la stessa energia di quelle che seguono nella evoluzione dell'iniezione. In conclusione, le particelle alla periferia del getto sono quelle che provengono dal carburante iniettato per primo, e queste, quindi, saranno le gocce che evaporano per prime.
- ✓ Un getto iniettato in una camera quiescente è caratterizzato da:
 - **una zona centrale** lungo l'asse del getto, nella quale le gocce sono più numerose e con velocità maggiori. Tali gocce sono quelle che raggiungeranno i punti più lontani dal foro d'uscita;
 - **una zona periferica** sede di forti interazioni aerodinamiche, pertanto la popolazione di gocce è minore, inoltre sono più lente e diffondono lateralmente.

III.14. Cenni sul moto dell'aria

La dosatura del combustibile non è sufficiente da sola a garantire buone prestazioni (coppia e potenza) del motore. Nei motori a combustione interna, soprattutto in quelli Diesel, il campo di moto all'interno del cilindro gioca un ruolo fondamentale.

I dettagli relativi al campo di moto dell'aria all'interno del cilindro controllano:

- ✓ il processo di miscelamento aria-combustibile sia in termini di preparazione della carica premiscelata, che in termini di evaporazione e combustione delle gocce che bruciano con fiamma di tipo diffusivo;
- ✓ lo scambio termico con le pareti del condotto;
- ✓ la concentrazione degli inquinanti allo scarico.

Questo significa che diventa essenziale essere in grado di predire le caratteristiche del campo di moto e intervenire affinché esse favoriscano le prestazioni del motore. Questo è oggi possibile grazie sia allo sviluppo di tecniche sperimentali avanzate (anemometria a filo caldo, anemometria laser-doppler, PIV ecc.) che alla disponibilità di elevate risorse computazionali e di avanzati modelli di calcolo.

La turbolenza

I campi di velocità all'interno del cilindro di un motore sono fortemente non stazionari con elevate intensità di turbolenza. Il flusso è turbolento e composto da vortici di dimensione variabile. L'energia si trasferisce dai vortici di dimensioni maggiori, fortemente instabili, a vortici di dimensioni via via più piccole. I vortici di dimensione minima scompaiono per effetto di una dissipazione della loro energia cinetica ad opera delle forze viscosive.

In un flusso turbolento, si generano fluttuazioni di velocità, temperatura, densità, pressione e concentrazione. L'influenza di tali componenti di fluttuazione sulle reazioni, sul rilascio del calore e sulla struttura della fiamma dipende dai relativi tempi caratteristici associati a ciascun elemento.

Sebbene esista una distribuzione continua di scale di lunghezza associate alle fluttuazioni turbolente di velocità e di variabili di stato, è conveniente focalizzare l'attenzione su alcune lunghezze estreme che determinano effetti separati sui flussi turbolenti. Per caratterizzare il campo di moto, dunque, oltre alle classiche grandezze medie e di fluttuazione, si utilizzano in genere scale spaziali e temporali caratteristiche.

- ✓ La scala integrale delle lunghezze l , che dà una misura dei vortici di dimensione maggiore ed è confrontabile con le dimensioni delle valvole, con l'alessaggio o con la corsa a seconda della fase (dell'ordine di 3-5 mm);
- ✓ La scala integrale dei tempi, t_l , che dà una misura del tempo medio di vita dei vortici di dimensione massima;
- ✓ La microscala delle lunghezze di Kolmogorov, η , che è una misura dei vortici che hanno la dimensione minima oltre la quale gli effetti di dissipazione molecolare sono tali da distruggere il vortice non appena si forma; essa è legata alla velocità di dissipazione dell'energia cinetica e alla viscosità cinematica del fluido (dell'ordine di 0,01-0,03 mm).

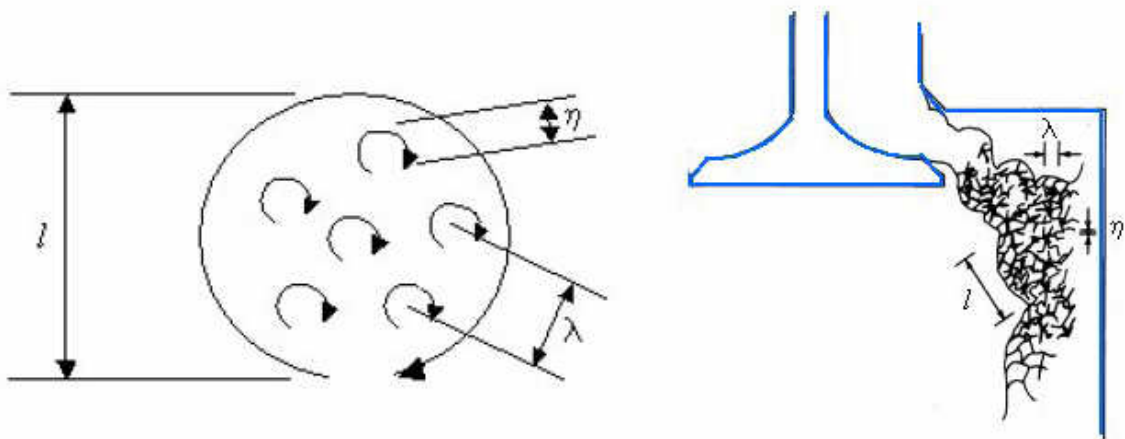


Fig. III.13: Scale di turbolenza

Moti secondari: swirl, tumble e squish

Oltre alla turbolenza, il campo di moto all'interno del cilindro di un motore a combustione interna è caratterizzato dalla presenza di moti secondari organizzati di tipo rotatorio sia su piani perpendicolari all'asse del cilindro, sia su piani passanti per tale asse. E', in genere, intervenendo su di essi che si cerca di favorire il processo di formazione della carica e la combustione.

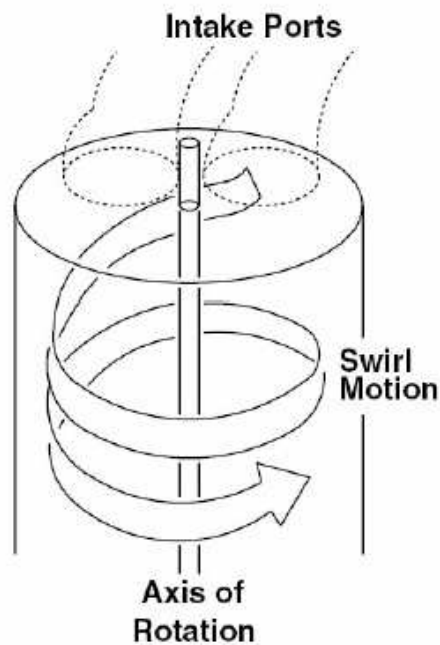


Fig. III.14: Moto di swirl

Con il termine swirl si definisce il moto rotatorio organizzato dell'aria su un piano circonferenziale perpendicolare all'asse del cilindro (Fig.III.14). La caratterizzazione dello swirl avviene attraverso indici o coefficienti di swirl, ricavati attraverso appositi sistemi di misura. Generalmente si usa un anemometro ad elica (una ventola leggera libera di ruotare intorno al proprio asse coincidente con l'asse del cilindro) posta ad una distanza prefissata dalla testa. La velocità di rotazione della ventola, ω_s , è usata direttamente come indice di swirl oppure permette di ricavare il rapporto di swirl $R_s = \omega_s D / v_{is}$, dove D è l'alesaggio e v_{is} una velocità caratteristica del flusso d'aria (in genere la velocità che avrebbe un flusso isoentropico dovuto al salto di pressione monte-valle della valvola di aspirazione).

- ✓ rapporto di swirl pari al rapporto fra una velocità caratteristica del moto di swirl.

Su di esso si interviene attraverso la geometria del condotto di aspirazione e del gruppo valvola/e di aspirazione:

- particolari configurazioni del condotto di aspirazione e delle valvole di aspirazione permettono la realizzazione del moto di swirl all'ingresso del cilindro:
 - schermo sulla parete della circonferenza delle valvole di aspirazione, in modo da imporre al flusso una direzione preferenziale. Esso è un sistema che produce elevate perdite di carico, riduce la luce di efflusso, aumenta il peso delle valvole e richiede artifici per impedire la rotazione della valvola;
 - condotti di aspirazione orientati in modo da conferire al getto uscente dalla valvola una distribuzione di velocità non uniforme lungo la circonferenza, orientando quindi il flusso verso la parete del cilindro, che gli impone a sua volta un moto rotatorio di swirl; sono poco efficaci alle piccole alzate, quando cioè la velocità del fluido nel condotto di aspirazione è bassa; alle grandi alzate comportano coefficienti di efflusso bassi dato che viene usata solo una parte della luce per smaltire tutta la portata (velocità non perpendicolare all'area di passaggio);
- un condotto di aspirazione di particolare forma imprime al flusso un moto rotatorio prima dell'ingresso nel cilindro:
 - condotti elicoidali con i quali si ottengono coefficienti di efflusso migliori che con la valvola schermata e elevati rapporti di swirl anche alle piccole alzate.

Con il termine Tumble si indica un moto rotatorio organizzato su un piano passante per l'asse del cilindro che si forma durante la fase di aspirazione ed è intensificato durante la fase di compressione. Il moto di tumble si

forma anche senza particolari configurazioni dei condotti e delle valvole dato che è la conseguenza diretta dell'interazione del flusso d'aria entrante con la parete del cilindro. Il campo di moto caratteristico di un motore ad accensione comandata con vortice di tumble è illustrato in figura III.15. Durante la fase di aspirazione si comincia a formare, infatti, un moto rotatorio organizzato in un unico vortice su un piano assiale. Durante la successiva fase di compressione, la risalita del pistone “schiaccia” il vortice, riducendone la dimensione e aumentandone l'intensità (energia cinetica). Il vantaggio principale del moto di Tumble è quello, dunque, di aumentare il mescolamento e l'intensità di turbolenza alla fine della corsa di compressione, favorendo e accelerando il processo di combustione.

Disegnando il gruppo condotto/valvole di aspirazione in maniera da aumentare la componente di velocità perpendicolare all'asse e dirigendo il flusso sotto la valvola di scarico si intensifica il moto di tumble. Ciò significa ridurre la luce di passaggio per aumentare la velocità fino a valori dell'ordine di 100-130 m/s. Questo penalizza però il riempimento del cilindro. Il tumble è importante soprattutto nei motori ad accensione comandata.

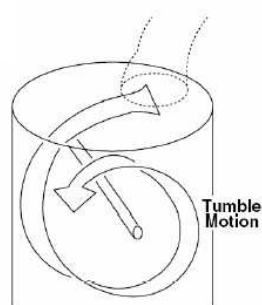


Fig. III.15: Moto di Tumble

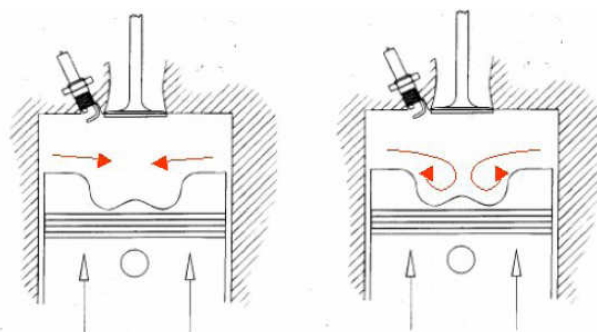


Fig. III.16: Moto di squish

Il termine Squish (Fig.III16) indica il moto rotatorio organizzato della carica su un piano contenente l'asse del cilindro. Lo squish si genera durante l'ultimo tratto della fase di compressione per interazione fra il flusso d'aria e le pareti del cilindro. In particolare, nei motori ad accensione comandata, è la particolare conformazione della testa del cilindro a generare lo squish, mentre nei motori ad accensione per compressione è la tazza ricavata nel pistone, a produrre un doppio vortice di squish alla fine della fase di compressione.

Nel caso dei motori Diesel il campo di moto nell'ultima fase della compressione, quando cioè comincia l'iniezione del combustibile, è prodotto dall'interazione fra il moto di swirl e il moto di squish. E' facile, dunque, comprendere l'importanza dell'intensificazione di tali moti secondari per favorire il processo di formazione della miscela (atomizzazione, diffusione ed evaporazione) e il successivo processo di combustione.

Occorre tenere presente che l'effetto della turbolenza e dei moti secondari dell'aria sullo spray ne modificano fortemente la forma e provocano una deviazione significativa della traiettoria del getto e delle singole gocce. Questo significa che la penetrazione dipende fortemente dal moto dell'aria (Fig.III.17). In generale, il risultato globale prodotto dalla turbolenza e dai moti secondari (swirl e squish) è quello di ridurre la penetrazione e favorire la polverizzazione, l'evaporazione e il miscelamento aria-combustibile.

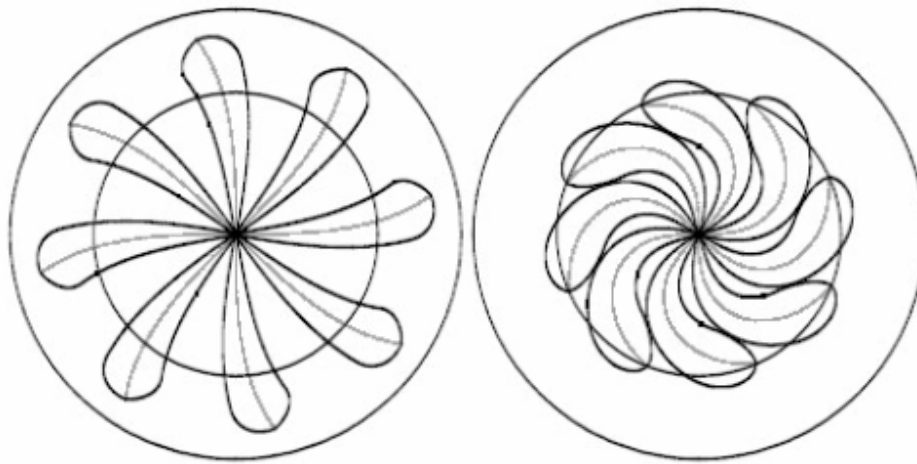


Fig. III.17: Effetto del moto di swirl sullo spray

Bibliografia

- [1] C. Arcoumanis, M. Gavaises, B. French, *Effect of fuel injection processes on the structure of diesel sprays*, SAE paper 970799, 1977.
- [2] K. Cokmez, J. Tuzla, J. Chen, Characteristics of a liquid-wall contact in post-CHF flow bowling, *Heat and Mass Transfer* Vol.43, 1999.
- [3] H. Chaves, M. Knapp, A. Kubitzek, F. Obermeier, T. Schneider, *Experimental Study of Cavitation in the Nozzle Hole of Diesel Injectors Using Transparent nozzles*, SAE Paper 950290, 1995.
- [4] M. Anatone, *Appunti dalle lezioni del corso di machine II*, Università degli studi di L'Aquila, A. A. 2001- 2002.
- [5] R. Cipollone, *Interazione tra le macchine e l'ambiente*, Appunti dalle lezioni del corso, Università degli studi di L'Aquila, A. A. 2001- 2002.
- [6] A. H. Lefebvre, *Atomization and Sprays*, Ed. Taylor and Francis.
- [7] G. Storace, *Metodologie di caratterizzazione degli spray diesel*, tesi di dottorato di ricerca in sistemi energetici ed ambiente, Università degli studi di Lecce.
- [8] L. Allocca, F. E. Corcione, *Measurement of Sauter mean diameter in a high pressure diesel spray*, Proceeding 11th European Conference of ILASS-Europe on Atomization and Spray PARTEC 95, Nurberg 1995.
- [9] P. Werleberg, W. P. Cartellieri, *Fuel Injection and Combustion Phenomena in High Speed DI Diesel Engine Observed by Means of Endoscopic High Speed Photography*, SAE Paper 870097, 1987.
- [10] Y. Mohammadi, K. Kidoguchi, K. Miwa, *Effect of Injection Parameters and Wall-Impingement on Atomization and Gas Entrainment Processes in Diesel Spray*, SAE Paper 2002-01-0947, 2002.
- [11] H. Tsunemoto, H. Ishitani, *The Behaviour of Impinged Fuel Sprays on Simulated Combustion Chamber Walls in Direct Injection Diesel Engine*, SAE Review, 3, 1982.
- [12] L. Marchitto, tesi di laurea: *Apparati di iniezione common rail per motori diesel heavy duty: strategie di iniezione e caratterizzazione dei getti di combustibile*, Relatore M. Migliaccio (DiME-UniNa) Co-relatore Dr. L. Allocca, Istituto Motori C.N.R., 2006
- [13] S. Umbertini, *Alimentazione del combustibile e moto della carica nei moderni motori Diesel*, Università di Roma “Tor Vergata” – Dispense del Corso di Motori a Combustione Interna

CAPITOLO IV

APPARATO SPERIMENTALE E METODOLOGIE DI PROVA

IV.1. Apparato sperimentale per l'analisi del getto di combustibile

Presso il “Laboratorio Spray” dell’Istituto Motori del Consiglio Nazionale delle Ricerche, sito in Napoli, è stato allestito un banco di prova che consente la determinazione di parametri caratteristici dello “spray” (portata istantanea e totale per strategie d’iniezione, distribuzione spaziale e temporale del fluido iniettato, penetrazione e velocità del tip, angolo del cono del getto) in funzione di parametri d’iniezione pressione, durata e contropressione in camera quiescente (riempita con del gas inerte in condizioni di densità tipiche motoristiche).

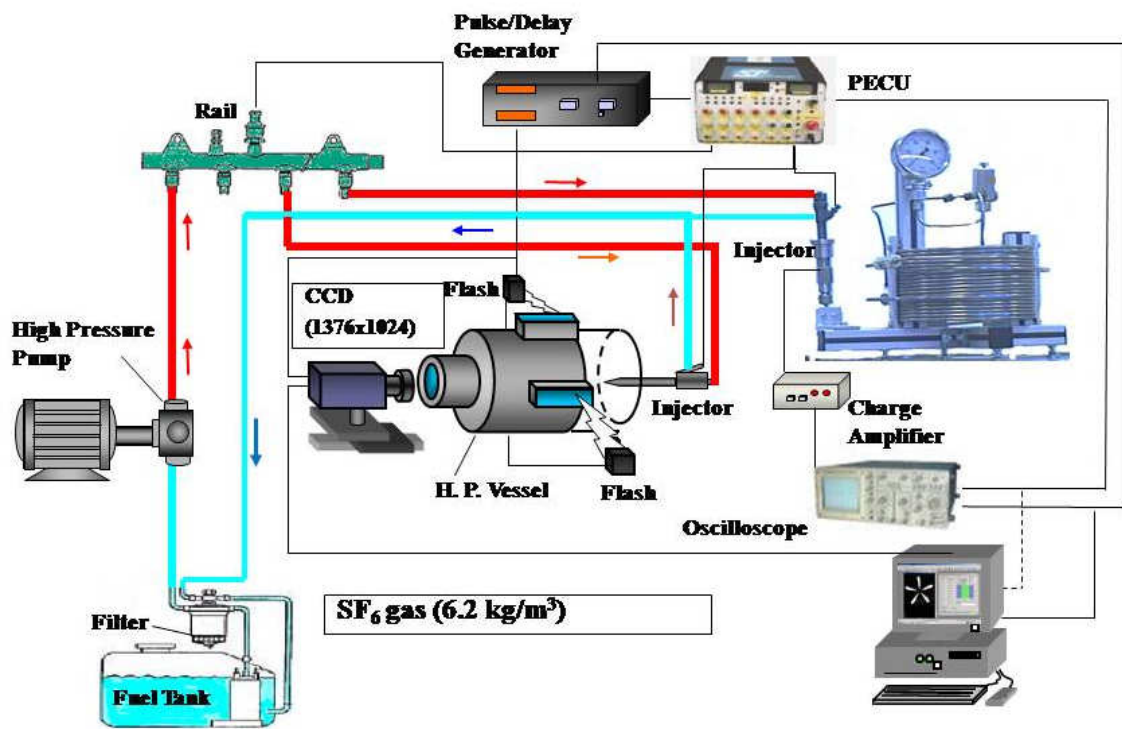


Fig. IV.1: layout dell'apparato sperimentale di prova

I componenti principali del *set-up* sperimentale sono:

- ✓ apparato d'iniezione, elettronicamente controllato attraverso una centralina a software aperto (rail con trasduttore di pressione 180 MPa f.s., pompa alta pressione, elettroiniettore, centralina di comando e di controllo),
- ✓ sistema di acquisizione immagini (telecamera CCD frame grabber per l'acquisizione immagini, sistema flash di illuminamento spray, computer, camera otticamente accessibile a pressione controllata, misuratore portata istantanea di combustibile).

Il tutto è gestito e controllato da una catena elettronica costituita da un'unità di generazione e ritardo di segnali di trigger e temporizzazione, un oscilloscopio (1GHz banda passante, quattro canali).

In Fig. IV.1 è rappresentato il layout dell'apparato sperimentale di prova.

Unità elettronica di controllo

Per il comando e controllo delle strategie di iniezione è stata installata e testata una unità elettronica di controllo dell'apparato (Electronic Control Unit - ECU). L'ECU è diversa da quelle d'uso comune su autovettura essendo a gestione aperta per impostazioni di differenti strategie di iniezione. Difatti viene comandata attraverso uno specifico software realizzato in Istituto Motori, il quale gestisce la legge di iniezione adeguandola alle specifiche esigenze sia in termini di numero di iniezioni (fino a dieci, attualmente le centraline dei multijet gestiscono 5 iniezioni: pilot, pre, main, after, post (vedi cap I par.I.5)) sia di timing. Attraverso il software interattivo, l'ECU provvede alla regolazione della pressione di iniezione, tramite un'azione di feedback sul sensore e sul regolatore di pressione, e al comando dell'iniettore agendo sull'eccitazione del solenoide tramite una corrente che può essere variata dai 5 ai 10 Ampere. Si possono in questo modo definire le durate delle iniezioni e i tempi di dwell. I necessari livelli di corrente sono 10 Ampere (corrente di picco), per l'energizzazione del solenoide e l'apertura dell'elettrovalvola, e 5 Ampere per la fase di mantenimento. A differenza di centraline commerciali che richiedono la corretta terminazione di tutti i sensori (misuratore di portata d'aria, temperatura dell'aria all'aspirazione, velocità di rotazione del motore, etc.), l'ECU può essere facilmente programmata e modificata solo nei parametri d'iniezione.

La centralina descritta ed utilizzata per la sperimentazione è rappresentata in Fig.IV.2.



Fig. IV.2: Unità elettronica di controllo

Apparato di iniezione

Il banco sperimentale per lo studio del sistema di iniezione Common-Rail è composto dai seguenti elementi:

- ✓ Inverter: converte la corrente alternata di rete in un'altra di diversa frequenza, variabile con continuità allo scopo di regolare la velocità di rotazione del motore asincrono trifase, ad essa direttamente proporzionale. Nelle tabelle IV.1 e IV.2 si riportano i dati di targa e i campi di regolazione dei principali parametri dell'inverter Invertek ODV – 34075 – EL installato;

Potenza nominale motore – 110% sovraccarico	7,5 kW
Tensione di alimentazione/fasi	380 -480 V/3
Tensione uscita/ fasi	0 – 480V/3
Corrente uscita – 150% sovraccarico	18 A
Minima resistenza di frenatura	22 Ω

Tabella IV.1 : Dati di targa Invertek ODV – 34075 – EL

Parametro	Campo di regolazione
Massima velocità	Dalla minima a 120 Hz
Minima velocità	Da 0 alla massima
Frequenza nominale motore	Da 25 a 120 Hz
Velocità nominale motore	Da 0 a 7200 rpm
Tempo di accelerazione(da 0 fino alla frequenza nominale)	Da 0 a 3000 s
Tempo di decelerazione	Da 0 a 3000 s
Tensione nominale motore	Da 20 a 500 V
Corrente nominale motore	Dal 20% al 100% della corrente nominale

Tabella IV.2 : Campi di regolazione dei parametri Invertek ODV – 34075 – EL

- ✓ Motore asincrono trifase della potenza di 7.5 KW;
- ✓ Serbatoio gasolio della capacità di 15 litri. Ad esso sono collegati il corpo di bassa pressione della pompa del Common Rail di alimentazione combustibile, ricircolo del gasolio dal circuito di alta pressione, sistema di raffreddamento del combustibile tramite scambiatore in rame utilizzando acqua di rete quale fluido refrigerante.
- ✓ Pompa volumetrica ad alta pressione CP1H3 di tipo alternativo a tre pistoncini, con regolatore di pressione incorporato. Essa è in grado di realizzare pressioni nel rail fino a 180 MPa. Riceve il gasolio attraverso il circuito di bassa pressione, ed alimenta il rail mediante una cannetta idonea a sopportare le pressioni di esercizio. E' inoltre dotata di un circuito di ricircolo del fluido eccedente. Il controllo del sensore di pressione agisce sul circuito di bassa pressione immettendo il combustibile solo in caso di effettiva necessità con evidenti risparmi sul lavoro di compressione del fluido se non necessario;
- ✓ Rail è un collettore di accumulo del gasolio ad alta pressione nel quale la pressione è mantenuta al valore impostato sull'ECU e generato dalla pompa d'iniezione;
- ✓ Gli iniettori utilizzati durante le prove sono di un tipo commerciale con differenti forature degli ugelli. Essi sono utilizzati in motori diesel ad iniezione diretta (DI) multiforo (8), con un angolo di spray di 148° e con diametro dei fori che va da 136 a 107 µm, conseguentemente il flusso che va da 480 a 300 cm³ (misurato in 30 sec a 100 bar).
- ✓ Scambiatore di calore per garantire, durante le prove, una temperatura costante del gasolio di 40 °C ±1 °C e quindi mantenere entro limiti ristretti la variazione della viscosità del fluido in funzione della temperatura;
- ✓ Il trasduttore piezoresistivo⁽¹⁾ Kistler 4067A2000 collegato al charge amplifier 4618A, montato sulla cannetta di alta pressione, immediatamente a monte dell'iniettore, permette la misura della pressione di iniezione e di sue eventuali oscillazioni.
- ✓ Sistema di ricircolo che recupera la parte di fluido eccedente non iniettato proveniente dalla pompa e dall'iniettore.

Oscilloscopio

L'oscilloscopio è uno strumento di visualizzazione/acquisizione di segnali elettronici su base temporale. E' stato utilizzato il modello TDS 684B, a quattro canali, frequenza di campionamento di 1 GHz, risoluzione verticale di 8 bit e lunghezza di registrazione massima per canale di 15.000 punti. La rappresentazione (o

(1) La **piezoresistività** è la proprietà dei semiconduttori di variare la propria resistenza elettrica in funzione delle deformazioni meccaniche cui sono sottoposti.

display) su quattro tracce ha permesso la puntuale verifica della sincronizzazione degli eventi, la misura dei ritardi tra gli stessi e la durata temporale dei singoli eventi.

I dati relativi ai segnali ricavati sono stati trasferiti su computer e graficati tramite software (Origin 6.0 nel nostro caso).

L'oscilloscopio visualizza in uscita segnali in tensione che, tramite opportuni fattori di conversione, permettono di risalire alla grandezza in gioco. Ad esempio, attraverso il fattore di conversione dipendente dalla curva di calibrazione del sistema trasduttore/amplificatore del segnale di pressione è stato possibile risalire ai valori delle grandezze durante le varie prove.

Sistema acquisizione e trattamento delle immagini

Consente l'acquisizione delle immagini dei getti nelle reali condizioni di pressione d'iniezione e densità del gas in camera. Le immagini raccolte sono poi processate off-line con software dedicati.

In figura IV.3 si riporta lo schema a blocchi della catena elettronica di controllo e comando. Il generatore 1 invia il segnale di comando alla centralina che comanda l'iniettore. Un'onda quadra con fronte di salita sincrono a quest'ultima viene trasmesso per il comando e controllo della CCD e dei flash. Agendo sul trigger d'uscita del generatore 2, si può posticipare l'acquisizione della CCD e l'attivazione dei flash rispetto all'inizio iniezione, acquisendo così immagini dello spray a tempi diversi dall'inizio dell'iniezione. Ad esempio in figura IV.4, è rappresentata una visualizzazione dei suddetti segnali sull'oscilloscopio, dove, per il gruppo CCD – flash, è stato impostato un ritardo di 400 μ s rispetto al segnale di iniezione.

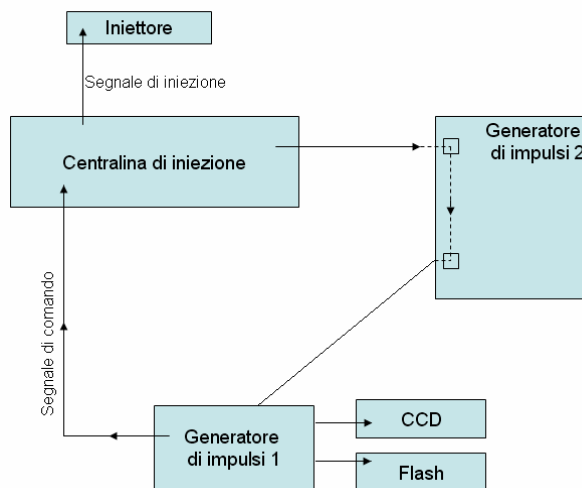


Fig. IV.3: Catena elettronica di comando e controllo.

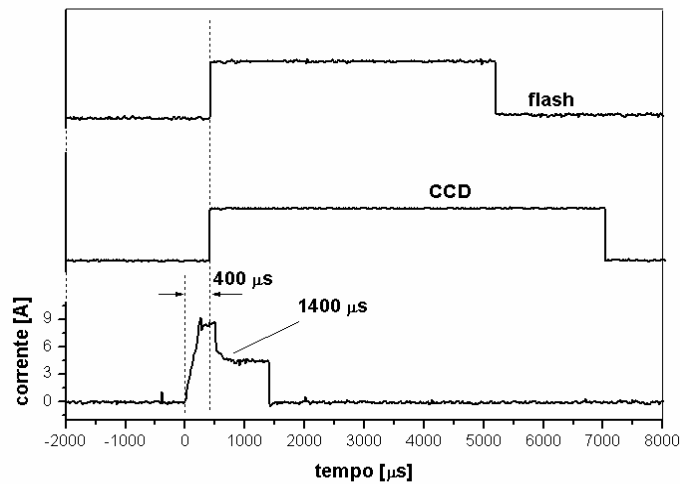


Fig. IV.4: segnali flash, CCD, corrente.

Il Sistema di acquisizione delle immagini è costituito da:

- ✓ Camera otticamente accessibile

La camera (Fig.IV.5)a forma cilindrica è dotata di quattro accessi ottici. Uno di essi, posto su una delle basi della camera ed a forma circolare, è in asse con la CCD e permette l'acquisizione delle immagini degli spray dell'iniettore posto sulla base opposta.

Tale camera contiene gas inerte in condizioni di densità medie tipiche motoristiche simulanti le condizioni in camera di combustione in corrispondenza dello start di iniezione.

Il gas utilizzato è tipicamente azoto N_2 o, in alternativa, esafluoruro di zolfo SF_6 che, avendo un peso molecolare circa cinque volte maggiore (146 g/mole contro i 28 g/mole dell'azoto), consente a parità di densità di operare in condizioni di maggior sicurezza, permettendo pressioni notevolmente più basse.

Si è operato a temperatura ambiente ed in condizioni quiescenti del gas in una camera in alluminio progettata per una pressione massima di 50 bar e con un coefficiente di sicurezza pari a 4, dal volume utile di 24 litri.

Per evitare fenomeni di annebbiamento della camera da gocce residue di combustibile iniettato e l'eccessivo deposito sulle finestre di accesso ottico, che potrebbero impedire la corretta acquisizione delle immagini, si è lavorato in modalità "single-shot".

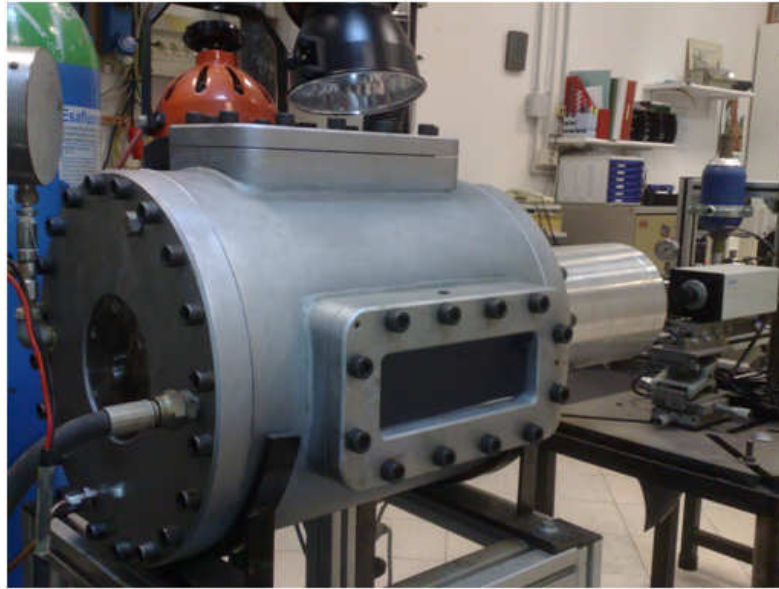


Fig. IV.5: Camera di iniezione otticamente accessibile a pressione controllata in asse con la telecamera CCD

✓ Generatore di impulsi

Il generatore di impulsi produce un segnale di tipo TTL rispetto ad un trigger interno o di comando esterno. L'impulso di uscita può essere opportunamente ritardato rispetto al segnale di trigger. Questo consente l'abilitazione di una successiva catena di comando/controllo con tempi variabili rispetto allo "start". Ad esempio, nel nostro apparato di misura, permette l'illuminazione dello spray e l'acquisizione delle relative immagini a tempi diversi dallo start di iniezione modificando i tempi di ritardo.

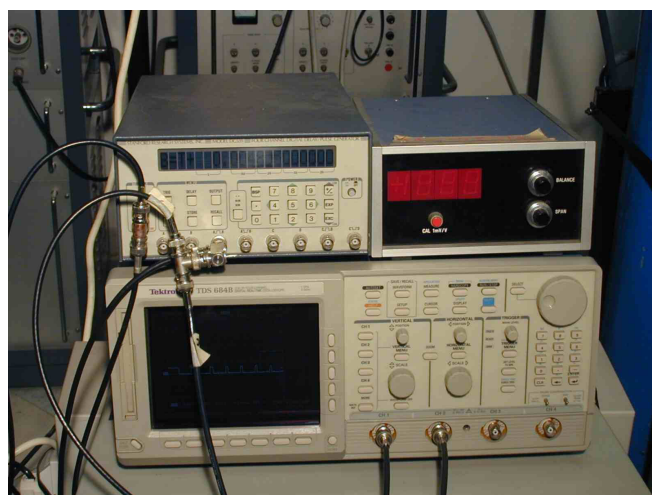


Fig. IV.6: Unità di generazione dei segnali e oscilloscopio

✓ Telecamera CCD

Il sistema CCD (charge-coupled devices = dispositivo a carica accoppiata) trova attualmente applicazione in diversi campi quali le riprese televisive e/o le visualizzazioni per usi scientifici e militari. Esso venne inventato da Boyle e Smith nel 1970 e da subito ha mostrato le sue peculiarità: scarsa incidenza dei disturbi, elevati frame rate⁽²⁾, alta risoluzione e sensibilità, ridotto aliasing⁽³⁾. Il CCD è costituito da una matrice di capacitori, chiamati gate, in semiconduttori di ossidi-metalli (MOS), che hanno le funzioni base di convertire fotoelettricamente la radiazione di luce incidente in una carica elettrica a questa proporzionale. Essa è poi accumulata in buche di potenziale create dall'applicazione di un apposito voltaggio agli elettrodi del capacitore MOS e trasferita utilizzando una variazione del potenziale applicato a due MOS successivi.

Si ha cioè, una matrice di elementi fotosensibili che consentono di convertire l'informazione visiva in un segnale elettrico.

La forma matriciale dei fotoelementi consente di ottenere un'immagine con risoluzione bidimensionale. Ciascun punto (denominato pixel) produce una quantità di fotoelettroni proporzionale all'intensità della luce che colpisce il sensore. Questa carica elettronica rappresenta l'informazione, sotto forma di segnale elettrico, relativa ad un particolare dell'immagine inquadrata, le cui dimensioni sono legate al gruppo ottico di raccolta. L'insieme di queste unità di informazione raccolte dall'intera matrice formano l'immagine dell'oggetto sotto osservazione.

Per poter essere lette e analizzate, queste informazioni devono essere ordinatamente e continuamente trasferite verso un elemento di storage.

Il trasferimento delle informazioni riguardanti l'intera immagine viene gestito da una serie di porte e registri disposti verticalmente, per la gestione di ogni singola colonna della matrice, e orizzontalmente per raccogliere i dati provenienti dalle varie colonne.

Il segnale in uscita risulta in definitiva una sequenza di valori di corrente ottenuti come risultato di una sorta di scansione effettuata su tutti i pixel della matrice sensibile. Attualmente esistono matrici CCD con risoluzione di 1024x1024 elementi sensibili e oltre.

② Il **frame rate** rappresenta la velocità con cui il sistema effettua la scansione dei suoi elementi sensibili.

(3) **Aliasing**: si ha quando si convertono segnali analogici in digitali per l'archiviazione delle immagini. Durante tale conversione il segnale viene campionato a intervalli regolari e successivamente ricostruito. L'aliasing è il fenomeno per il quale due diversi segnali possono diventare indistinguibili una volta campionati.

✓ Software per l'elaborazione immagini

L'Image processing ha la funzione di trattare le immagini allo scopo di estrarre le informazioni che sono contenute in esse. Il Digital Image Processing è una metodologia specifica di processamento tramite computer che sfrutta la digitalizzazione delle immagini fornita dalla CCD.

In funzione delle potenzialità dell'hardware e della complessità delle immagini può essere usato un sistema fino a 32 bit di risoluzione per memorizzare ogni valore di pixel. Per esempio, una immagine contenente solo bianco e nero può essere ben rappresentata da un singolo bit: 0=nero, 1=bianco, ma per un'immagine più complessa come quelle trattate in questo studio che contiene molte più informazioni, è necessario un numero di bit più alto per una migliore risoluzione di intensità. È possibile poi applicare una scala di colori (pseudocolori) per una più efficace visualizzazione delle zone a diversa intensità luminosa.

Il numero dei bit usati per rappresentare il valore del pixel è la misura della "profondità" del pixel e serve per determinare la classe dell'immagine. In Image-Pro Plus (software professionale usato per elaborare le immagini degli spray) sono presenti le seguenti classi:

Gray scale 8; Gray scale 12; Gray scale 16; Floating point (gray scale32); RGB 24; RGB 36; RGB 48;

Nella scala di grigi il valore del pixel rappresenta un livello luminosità che va dal nero al bianco. Si ha cioè una classe dove con 0 si rappresenta il nero e con 255 (o 4095 o 65,535 in base al fatto che si usi un sistema a 12 o a 16 bit) si rappresenta il bianco.

Le classi RGB invece rappresentano immagini a colori dove l'intensità luminosa di ogni pixel è ottenuta come combinazione dei tre colori primari rosso (R), verde (G) e blu (B).

Il primo passo per poter studiare la struttura e l'evoluzione temporale di uno spray è il trattamento delle immagini raccolte con la CCD.

Da un buon trattamento delle immagini deriva la possibilità di fare un'analisi più fedele della loro evoluzione, riuscendo da un lato ad isolare effetti che potrebbero non essere legati allo spray ma alla strumentazione con cui è stata svolta la sperimentazione e dall'altro ad evidenziare effetti peculiari del fenomeno.

Uno dei fattori è trovare una procedura di trattamento delle immagini che permetta di racchiudere lo spray in un contorno ben delineato senza eccessive perdite di informazioni relative alla zona più esterna del getto. Infatti questa, a densità minore, è molto importante per la formazione del mix aria-combustibile, ma allo stesso tempo è border line rispetto alla luminosità spuria presente in camera.

Si parte con una sottrazione di fondo che può essere fatta anche on-line. La funzione di sottrazione attribuisce a ciascun pixel un valore “corretto” dell’intensità luminosa, sottraendo a ciascun pixel quello di un’immagine in assenza di spray, presa come riferimento per il fondo. In questo modo lo scattering spurio dovuto alle impurità di fondo già presenti in camera prima dell’iniezione e alle riflessioni delle parti metalliche della camera stessa vengono eliminate dall’immagine raccolta dalla CCD.

La fase di elaborazione delle immagini avviene “off line” mediante il software dedicato Image Pro-Plus.

É possibile applicare inoltre una funzione di threshold che lavora su valori di soglia dell’intensità luminosa, assegnando ai pixel al di sotto di un certo valore, luminosità nulla (colore nero). Lavorando sui valori di soglia si è riusciti a settare il range di intensità in grado di rappresentare al meglio il getto in esame.

Settando valori alti di soglia si riesce ad eliminare bene la parte intorno alla colonna di getto liquido principale perdendo però parte delle zone più esterne; settando invece valori bassi di soglia si riesce a comprendere il getto nella sua interezza ma non si elimina il “rumore” nel suo intorno.

Completa il banco prova la seguente strumentazione:

- ✓ Misuratore di portata istantanea e totale AVL
- ✓ Bilancia di precisione.

Misuratore di portata istantanea e totale AVL

Il misuratore di portata istantanea AVL (Fig.IV.7) utilizzato è basato sul principio del tubo di Bosch. Esso è costituito da una lunga tubazione in acciaio di diametro interno costante, riempita di combustibile e mantenuta a pressione costante (circa 50 bar) per mezzo di una valvola tarata posta ad un estremo. All’inizio della tubazione vi è un adattatore per il posizionamento dell’iniettore in esame.

Nella piccola camera d’iniezione posta immediatamente a valle del nozzle, un trasduttore rileva le variazioni istantanee di pressione dovute all’immissione di combustibile. Da qui la necessità di una valvola di regolazione che mantenga valori di pressione sufficientemente elevati, in modo da evitare fenomeni di cavitazione a valle del nozzle, dove ha sede il trasduttore. Questo fenomeno potrebbe infatti falsare le misure di pressione realizzate nella cameretta di iniezione.

La tubazione ha una lunghezza complessiva L di 18 m, ottenibile congiungendo quattro sezioni di diametro interno costante pari a 4 mm, diametro esterno 8 mm e lunghezza variabile: due da 6 m e due da 3 m. Una tubazione lunga è vantaggiosa perché aumenta il tempo di riflessione ($2L/a$, dove “a” è la velocità del suono

nel fluido) dell'onda d'urto indotta dall'iniezione di combustibile e riduce le probabilità che l'onda riflessa interferisca con onde prodotte da successive iniezioni. Alla fine del condotto calibrato è presente una valvola regolatrice per fissare la pressione nel tubo migliore. Essa mantiene costante la pressione nel sistema di misura facendo defluire l'eccesso di combustibile proveniente dalle successive iniezioni.

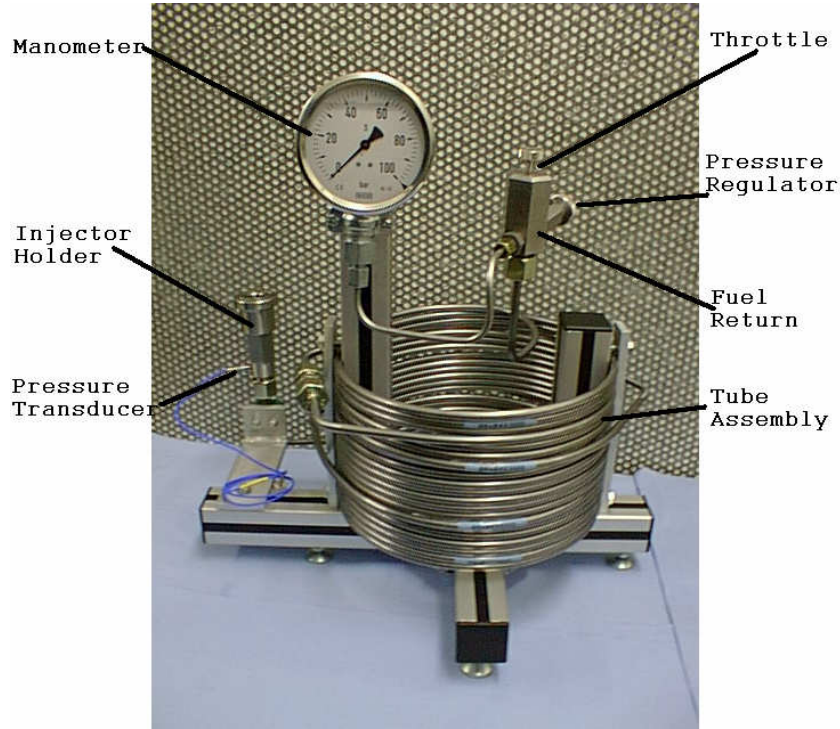


Fig. IV.7: Misuratore di portata AVL

Tutto il combustibile è iniettato nel condotto di misura. Il trasduttore di pressione usato è un GM12D-AVL piezoquarzo. Il segnale elettrico rilevato è amplificato da un charge amplifier AVL 3057-V01. La risoluzione del misuratore è determinata dalla base dei tempi del sistema trasduttore-amplificatore.

La quantità iniettata è direttamente proporzionale alla pressione misurata ed è fornita dalla relazione seguente:

$$\dot{q} = \frac{\Delta p_{gauge} \cdot A_{tube} \cdot 10^5}{a \cdot \rho} \quad (1)$$

dove \dot{q} è la quantità istantanea iniettata di combustibile [mm³/s], Δp_{gauge} [bar] è la variazione di pressione rilevata dal traduttore nella camera di allagamento a valle dell'iniettore, A_{tube} è l'area della sezione interna della tubazione [mm²], "a" è la velocità di propagazione delle onde di pressione ovvero sia la velocità del suono nel fluido [m/s], "ρ" è la densità del fluido [kg/l] e 10⁵ è un fattore che tiene conto delle unità di misura. La

portata è quindi legata alla variazione di pressione rilevata dal trasduttore, attraverso parametri legati alla geometria del sistema di misura e alle caratteristiche chimico-fisiche del combustibile.

Nota allora la portata volumetrica istantanea, è facile calcolare la quantità totale iniettata durante l'intervallo di iniezione [istante inizio iniezione t_{i-inj} , istante fine iniezione t_{f-inj}] come

$$Q = \int_{t_{i-inj}}^{t_{f-inj}} \dot{q} \cdot dt \quad [\text{mm}^3]$$

e allo stesso modo è possibile calcolare la portata massica

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{q} \quad [\text{mg/s}]$$

e perciò la massa totale iniettata

$$M = \int_{t_{i-inj}}^{t_{f-inj}} \dot{m} \cdot dt \quad [\text{mg}]$$

Bilancia digitale di precisione.

Il valore della quantità iniettata, calcolato con la formula (1), è stato poi confrontato con il valore medio di pesata effettuata recuperando in apposite burette il combustibile raccolto dall'ugello di scarico del misuratore di portata

Detta quantità è stata pesata con una bilancia digitale di precisione (Fig.IV.8) OHAUS, modello Explorer 410GX1, aventi le seguenti caratteristiche:

- | | | | |
|---------------------------|----------|-------------------------------|-----------------------|
| • Portata massima: | 410 g | • Linearità: | $\pm 0.002 \text{ g}$ |
| • Precisione indicazione: | 0,001 g | • Tempo di stabilizzazione: | < 3 sec |
| • Ripetibilità: | 0.0005 g | • Range di temperatura d'uso: | 10-40°C |

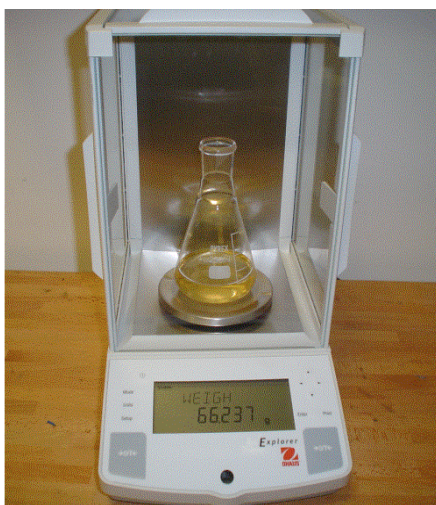


Fig. IV.8: Pesata in buretta.

IV.2. Metodologia e procedure di indagine

La metodologia d'indagine utilizzata per la sperimentazione presenta notevoli potenzialità per la caratterizzazione delle leggi di iniezione e fa uso di fogli elettronici di analisi dati predisposti abbinati ad un giornale di laboratorio per la trascrizione manuale delle condizioni di test.

L'attività sperimentale svolta è finalizzata alla caratterizzazione di tre diverse tipologie di iniettori, con tre combustibili (gasolio, RME, RME invecchiato), per diverse strategie d'iniezione, in termini di portate istantanee di combustibile e di evoluzione spazio-temporale dei getti mediante acquisizione delle immagini, con l'apparato sperimentale descritto precedentemente

I combustibili utilizzati nella ricerca sono stati classificati, come da tabella seguente:

Identificativo	Combustibile
1	Gasolio
2	RME
3	RME invecchiato

Tab. IV.3 : Identificazione dei combustibili

Il gasolio utilizzato è un gasolio minerale per autotrazione, mentre l'RME ed RME invecchiato sono biodiesel. Come già descritto ampiamente nel Cap. II, il biodiesel è un biocombustibile, cioè un combustibile ottenuto da fonti rinnovabili quali oli vegetali e grassi animali, dalle caratteristiche fisico-chimiche simili al gasolio per uso in motori a combustione interna. Un biodiesel è ottenuto dalla colza, girasole, soia, ecc., attraverso un processo chimico di transesterificazione con metanolo. Il biodiesel di prima generazione, identificato con l'acronimo FAME (Fatty Acid Methyl Ester - estere metilico di acidi grassi), è ottenuto interamente da olio vegetale; ha caratteristiche chimico-fisiche simili al gasolio minerale per autotrazione (ottenuto per distillazione frazionata del petrolio grezzo). In particolare l'RME è metilestere di colza, ottenuto dall'olio di colza, mentre l'RME invecchiato è un RME sottoposto ad un processo forzato di irrancidimento per ossidazione.

Il campione viene esposto ad un flusso di aria a temperature di 50-220°C (metodo Rancimat – rif. EN 14112 o EN 15751).

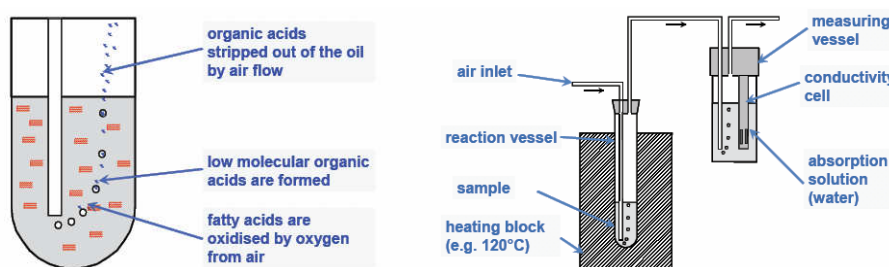


Fig.IV.10: Principio del metodo Rancimat

Questi processi di ossidazione, che si svolgono lentamente a temperatura ambiente, sono noti come autossidazione.

Iniziano con reazioni radicali degli acidi grassi insaturi e, in un processo a più stadi, portano ad una varietà di prodotti di decomposizione, perossidi, alcoli, aldeidi, in particolare, acidi carbossilici.

Nel metodo Rancimat il campione è esposto ad un flusso di aria a temperature di 50-220 °C (vedi Fig.IV.10). I prodotti di ossidazione volatili (principalmente acido formico) sono trasferiti al recipiente di misurazione del flusso d'aria e assorbito nella soluzione di misura (acqua distillata).

Viene registrata in continuo la conducibilità di questa soluzione di misura e tracciata in modo continuo una curva di ossidazione (rappresentata in Fig.IV.11), il cui punto di flesso conosciuto come il tempo di induzione (Induction period) I_p , il quale fornisce il valore caratteristico ai fini della valutazione della stabilità all'ossidazione.

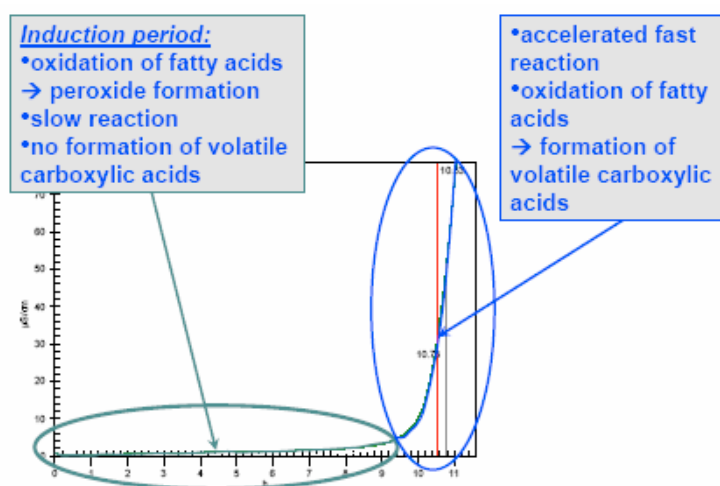


Fig.IV.11: Curva Rancimat

Le proprietà chimico-fisiche dei combustibili sono state riportate rispettivamente nelle tabelle IV.4, IV.5 e IV.6.

Proprietà chimico-fisica	Valore	Metodo di test
Densità (a 40°C), in kg/m ³	820	PER CALCOLO
Viscosità cinematica (a 40°C), in cSt	2.716	UNI EN ISO 3104:2000
Potere lubrificante (a 60°C), in μm	181	UNI EN ISO 12156-1:2007
Numero di Cetano	51.9	UNI EN ISO 5165:2001
Carbonio, % in massa	86.5	ASTM D5291-09
Idrogeno, % in massa	13.3	ASTM D5291-09
Ossigeno, % in massa	0.2	PER CALCOLO
Potere calorifico superiore, in MJ/kg	45.525	ASTM D240-09
Potere calorifico inferiore, in MJ/kg	42.700	ASTM D240-09

Tab. IV.4: Caratteristiche del gasolio

Proprietà chimico-fisica	Valore	Metodo di test
Densità (a 40°C), in kg/m ³	867	PER CALCOLO
Viscosità cinematica (a 40°C), in cSt	4.469	UNI EN ISO 3104:2000
Potere lubrificante (a 60°C), in µm	119	UNI EN ISO 12156-1:2007
Numero di Cetano	53.3	UNI EN ISO 5165:2001
Periodo d'induzione, in ore	2.6	UNI EN 15751:2009
Numero di acidità, in mg di KOH/g	0.35	ASTM D664-09°
Carbonio, % in massa	79.1	ASTM D5291-09
Idrogeno, % in massa	12.1	ASTM D5291-09
Ossigeno, % in massa	8.8	PER CALCOLO
Potere calorifico superiore, in MJ/kg	39.885	ASTM D240-09
Potere calorifico inferiore, in MJ/kg	37.315	ASTM D240-09

Tab. IV.5: Caratteristiche dell'RME

Proprietà chimico-fisica	Valore	Metodo di test
Densità (a 40°C), in kg/m ³	862	PER CALCOLO
Viscosità cinematica (a 40°C), in cSt	4.567	UNI EN ISO 3104:2000
Potere lubrificante (a 60°C), in µm	173	UNI EN ISO 12156-1:2007
Numero di Cetano	57.0	UNI EN ISO 5165:2001
Periodo d'induzione, in ore	0.6	UNI EN 15751:2009
Numero di acidità, in mg di KOH/g	0.24	ASTM D664-09°
Carbonio, % in massa	79.2	ASTM D5291-09
Idrogeno, % in massa	12.1	ASTM D5291-09
Ossigeno, % in massa	8.7	PER CALCOLO
Potere calorifico superiore, in MJ/kg	40.015	ASTM D240-09
Potere calorifico inferiore, in MJ/kg	37.445	ASTM D240-09

Tab. IV.6: Caratteristiche dell'RME invecchiato

Al fine di ottenere una buona caratterizzazione per ciascuna delle nove coppie iniettore/combustibile (3 iniettori x 3 combustibili) sono state simulate nove diverse condizioni di funzionamento, che si differenziavano tra loro per:

- ✓ Pressione d'iniezione [MPa] : 40, 80, 160.
- ✓ Tempo d'energizzazione (ET) [µs] : 300, 600, 1000.

Data la considerevole la quantità di casi da analizzare (3 iniettori, 3 combustibili, 3 pressioni, 3 tempi) $3^4 = 81$, era necessario scegliere una strategia di sperimentazione che riducesse al minimo i tempi tenendo conto di fattori tecnici e logistici quali il ripristino degli impianti dopo l'uso di un determinato combustibile, la messa a punto dopo ogni cambio di iniettore, l'impostazione software sulla centralina. In ordine di priorità si è optato per il combustibile, per l'iniettore ed a seguire per la strategia.

Nel prosieguo per "strategia di prova" si intenderà una prova sperimentale eseguita su un tipo di iniettore e combustibile per una assegnata pressione e durata di iniezione. P.e. A1 – 160 – 1000, significa che viene

eseguita una prova sull'iniettore A utilizzando gasolio a pressione impostata CR di 160 MPa e per una durata di iniezione di 1000 μ s.

Fissato il combustibile per ciascun iniettore sono state eseguite le seguenti attività sperimentali:

- ✓ Rilevazione, al banco di prova, della legge di iniezione (fuel injection rate) a cui è seguito l'iter di misurazioni:
 - Portate istantanee e quantità iniettate attraverso l'analisi off-line del fuel injection rate;
 - Quantità iniettate medie attraverso la bilancia di precisione.
- ✓ Acquisizione immagini, al banco di prova, della distribuzione spazio-temporale dei getti di combustibile in camera, in modalità di iniezione “*single shot*”, a cui è seguito l'iter di misurazioni:
 - Misure di dispersione con curve di penetrazione;
 - Angoli di cono per condizioni dei getti completamente sviluppati ($t > 500 \mu$ s).

A banco prova a regime (temperatura del combustibile nel serbatoio intorno ai 40°C) si dà il *run* all'intero sistema: durante le prove vengono registrate dall'oscilloscopio le pressioni rilevate dal trasduttore nel misuratore di portata istantanea AVL, il segnale di energizzazione dell'iniettore e i segnali di sincronismo per i flash e la telecamera CCD. E' così possibile effettuare, off-line, tutte le analisi sopra descritte.

Gli spray tipici dei motori a combustione interna sono caratterizzati da un elevato grado di instazionarietà, ed è quindi necessario realizzare un dispositivo capace di sincronizzarsi con l'evento.

Un aspetto che va affrontato è quello del “blurring”, ovvero la necessità di ottenere immagini “a fuoco” di oggetti in rapido movimento come le gocce in uno spray ad alta pressione d'iniezione, caratterizzati da velocità di avanzamento dell'ordine della centinaia di metri al secondo. Questo risultato può essere conseguito, in linea di principio, mediante due modalità:

- ✓ impiego di una sorgente continua di illuminazione accoppiata con dispositivi di acquisizione immagini a tempi di esposizione fortemente ridotti.
- ✓ impiego di un dispositivo di raccolta immagini, a tempi di esposizione lunghi o continui, accoppiato ad una sorgente luminosa pulsata con durate dell'emissione particolarmente ristrette (laser pulsati, lampade stroboscopiche).

Ognuna delle soluzioni va calibrata sulle specifiche esigenze dell'esperimento tenendo conto della necessità di forti intensità luminose, alte risoluzioni spazio/temporali, dimensioni fisiche dell'oggetto, etc.

L'adozione di dispositivi illuminanti e/o di acquisizione non continui pongono il problema di un'adeguata sincronizzazione, fra loro e con il fenomeno sotto osservazione.

Altra problematica fondamentale è data dalla necessità di poter acquisire immagini risolte temporalmente e quindi con una frequenza sufficientemente elevata da consentire un'analisi significativa dell'evoluzione dell'evento d'iniezione. Considerando una durata tipica del fenomeno di qualche ms, per ottenere una risoluzione accettabile (per esempio 10 immagini per processo) sarebbe necessaria una frequenza di funzionamento del sistema di 10 kHz. Operare a simili frequenze richiede caratteristiche funzionali dei sistemi di visualizzazione molto spinte. L'acquisizione di più immagini relative ad un singolo evento di iniezione è ad oggi, disponendo di una sorgente luminosa pulsata a tali frequenze (lampada stroboscopia, laser a vapori di rame), consentita solo da sistemi di fotografia rapida, cineprese ad alta velocità o da costose telecamere digitali. L'impiego della cinematografia veloce nel campo degli spray è attualmente in fase di declino (fatta eccezione per particolari tipi di indagine) per la sua scarsa flessibilità e per la lunghezza delle procedure (ripresa, sviluppo e digitalizzazione delle immagini). Tuttavia la necessità di operare a frequenze così elevate può ritenersi superata dal fatto che l'obiettivo della ricerca è la caratterizzazione del comportamento medio degli spray più che lo studio puntuale dei meccanismi di formazione ed evoluzione del getto e che il comportamento globale del getto non varia molto da ciclo a ciclo. In quest'ambito, l'analisi sul singolo evento *cycle resolved* è probabilmente meno interessante per le prestazioni del motore.

La necessità di analisi media del fenomeno può essere realizzata mediante acquisizioni su cicli successivi di immagini, nelle stesse condizioni temporali, ad esempio, a ritardo fissato rispetto all'inizio dell'iniezione. Tale insieme d'immagini costituisce il campione rappresentativo dello spray al fissato ritardo, su cui verranno eseguite le misure. Si tratta di realizzare una media su un insieme di fenomeni periodici quali sono gli spray in maniera concettualmente analoga alla caratterizzazione della turbolenza nei motori a combustione interna. L'illuminazione del getto è ottenuta per mezzo di flash, il cui segnale di comando è sincronizzato con quello della CCD. Essendo la durata della luce emessa dai flash pari ad alcuni ms, all'incirca uguale alla durata dell'intero fenomeno di iniezione, nella metodologia da noi adottata è la telecamera ad avere tempi di acquisizione brevi, per potere rilevare immagini riferibili ad un preciso istante (o breve intervallo) temporale senza effetti di blurring. Tale controllo viene effettuato mediante la regolazione dello shutter della telecamera.

Le immagini acquisite dalla CCD sono memorizzate su computer, trattate ed analizzate off-line con software professionale d'elaborazione. È possibile, quindi, ricavare le volute misure per caratterizzare l'evoluzione spaziale e temporale del getto.

Bibliografia

- [1] S. Alfuso, L. Allocca, G. Caputo, F. E. Corcione, A. Montanaro, G. Valentino, *Experimental investigation of a spray from a multi-jet Common Rail Injecton System for small engines*, SAE Paper 2005-24-090, 2005.
- [2] L. Allocca E. Mancaruso, A. Montanaro, B. M. Vaglieco, *Alternative Diesel Fuels Characterization in Non Evaporating and Evaporating Conditions for Diesel Engines*, SAE Paper 2010-01-1516, 2010.
- [3] L. Allocca E. Mancaruso, A. Montanaro, B. M. Vaglieco, A. Vassallo, *Renewabel Biodiesel/Reference Diesel Fuel Mixtures Distribution in Non Evaporating and Evaporating Conditions for Diesel Engines*, SAE Paper 2009-24-0054, 2009.
- [4] L. Marchitto, tesi di laurea: *Apparati di iniezione common rail per motori diesel heavy duty: strategie di iniezione e caratterizzazione dei getti di combustibile*, Relatore M. Migliaccio (DiME-UniNa) Co-relatore Dr. L. Allocca, Istituto Motori C.N.R, 2006
- [5] F. Esposito, tesi di laurea: *Caratterizzazione di spray biodiesel e gasolio con elettroiniettori Common Rail Euro5*, Relatore A. Senatore (DiME-UniNa) Co-relatore Dr. L. Allocca, Istituto Motori C.N.R, 2010

CAPITOLO V

MISURE ED ELABORAZIONE DATI

V.1. Misure del fuel injection rate e caratterizzazione dei getti

Sono state eseguite le prove al banco per un dato combustibile ed iniettore seguendo l'ordine decrescente della pressione e del tempo di energizzazione.

Per l'analisi del fuel injection rate sono stati registrati con l'oscilloscopio, per ciascuna condizione di prova, due segnali: uno relativo alla corrente di eccitazione del solenoide, che ci ha permesso di monitorare la tempistica della fase di energizzazione dell'iniettore e di dare "un'origine temporale" al fenomeno, ed uno relativo alla pressione raccolta a valle del polverizzatore. Tutti i segnali sono stati mediati su 50 acquisizioni con una risoluzione temporale di 10 μ s. La pressione misurata nel misuratore, costante per evitare fenomeni di cavitazione, è stata fissata a 5.0 MPa = 50 bar. Tale parametro è stato monitorato per controllare oscillazioni o derive.

Dopo l'acquisizione dei segnali si passa all'analisi dei dati per la determinazione del fuel injection rate. Essendo nove le condizioni di funzionamento ciascuna ripetuta tre volte, i segnali da analizzare erano 27 correnti e 27 portate di combustibile dal misuratore di portata istantanea AVL. Le curve (I, t corrente in funzione del tempo) e (p, t pressione in funzione del tempo) sono state analizzate attraverso fogli elettronici appositamente preparati e graficati con *Origin*. Il segnale di estensione .*cvs* fornito dall'oscilloscopio è stato analizzato con *Origin* e laddove presenti fattori di offset sul segnale di pressione sono stati corretti. L'analisi dati ha fornito le portate istantanee e, attraverso l'integrale del fuel injection rate, la quantità iniettata per colpo [mm^3/str].

Le misure ottenute con la bilancia di precisione sono servite per confronto con i valori determinati attraverso l'analisi del fuel injection rate. Difatti, le misurazioni dirette potrebbero subire errori sistematici ed aleatori non rilevabili dal sistema per cui si è ricorso alla comparazione con un sistema alternativo.

Successivamente l'iniettore è stato collocato all'interno della camera otticamente accessibile.

Sono state eseguite attività preliminari quali la messa a fuoco delle telecamera CCD e la calibrazione.

Per visualizzare spazialmente il getto fin dall'istante iniziale e per l'intera durata dell'iniezione sono stati utilizzati due obiettivi con due diverse focali (f), nell'intento di massimizzare la risoluzione spaziale nei primi istanti di iniezione.

E' stato utilizzato un obiettivo $f = 50$ mm con una risoluzione di 10,10 pixel/mm fino a che la rosa dei getti rientrava nel campo visivo da esso definito. Successivamente è stato utilizzato l'obiettivo $f = 25$ mm con risoluzione spaziale ridotta a 4.70 pixel/mm.

Le immagini utilizzate per la calibrazione sono rappresentate in figg. V.1 e V.2.

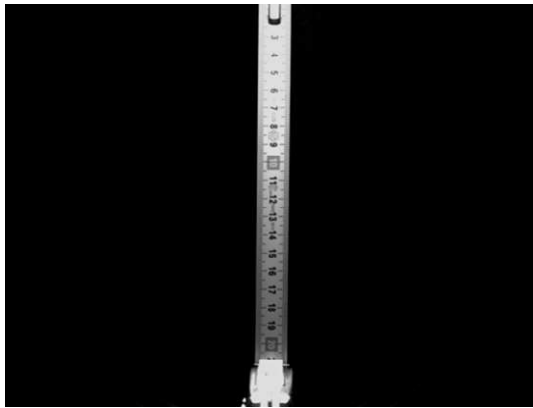


Fig. V.1: Immagine utile ai fini della calibrazione con obiettivo 25 mm

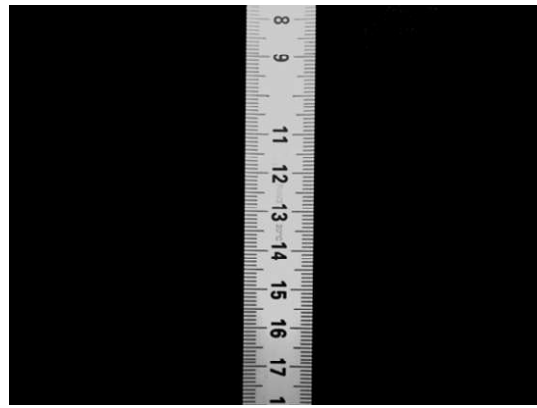


Fig. V.2: Immagine utile ai fini della calibrazione con obiettivo 50 mm

Le operazioni preliminari hanno previsto la chiusura ermetica della camera, lo svuotamento dell'aria con l'ausilio di una pompa da vuoto e la successiva immissione di esafluoruro di zolfo per creare le condizioni di densità in camera previste per la specifica condizione di prova. Nel caso si sono scelte delle coppie pressione d'iniezione/densità in camera simulanti condizioni motoristiche:

- $p_{inj}/\rho_{ch} = 40 \text{ MPa} / 16.3 \text{ kg/m}^3$
- $p_{inj}/\rho_{ch} = 80 \text{ MPa} / 18.6 \text{ kg/m}^3$
- $p_{inj}/\rho_{ch} = 160 \text{ MPa} / 23.9 \text{ kg/m}^3$

Le prove in camera per un dato combustibile ed iniettore sono state eseguite seguendo l'ordine decrescente della pressione e del tempo di energizzazione.

Fondamentale ai fini dell'ottenimento della curva di penetrazione è la determinazione dello "zero", cioè dell'istante corrispondente all'inizio effettivo dell'iniezione (t_0). Infatti il segnale di *trigger* corrispondente all'energizzazione che la centralina invia all'iniettore non corrisponde allo zero (effettiva fuoriuscita del fluido) a causa delle inerzie degli equipaggi mobili dell'iniettore stesso. L'iniezione inizia circa 350 μs dopo lo start elettrico e di tale ritardo bisogna tener conto per la valutazione dello zero per ogni iniettore, per ogni combustibile e per ogni pressione di iniezione. Tutto ciò si realizza seguendo una metodologia iterativa, attuabile con un generatore di impulsi ritardabili il quale *shifta* gradualmente l'apertura della camera CCD rispetto al segnale di trigger fino all'individuazione dello zero. Successivamente, si incrementa

il ritardo acquisendo immagini a tempi successivi e definiti fino alla fine dell'iniezione in modo da poter ottenere l'intero andamento della penetrazione dei getti in camera quiescente di iniezione.

Le immagini acquisite sono state analizzate con *Image Pro Plus* e ricavati i principali parametri caratteristici di uno spray: penetrazione assiale ed angolo di cono. E' stato calcolato il valore medio della penetrazione sugli 8 getti di una medesima immagine mediato sulle 5 acquisizioni reiterate allo step temporale. Le misure ottenute sono state diagrammate con il software *Origin*, ricavando le curve di penetrazione. L'analisi delle immagini prevede la determinazione degli angoli di cono in condizioni di spray completamente sviluppato ($t > 500 \mu s$). Per la misurazione dell'angolo di cono si è utilizzato la metodologia citata in Bibliografia. I valori degli angoli di cono sono stati mediati su tutti i getti delle immagini a $1000 \mu s$.

In figura V.3 viene schematicamente riportata la metodologia utilizzata per le misure della lunghezza di penetrazione assiale e dell'angolo di cono, come precedentemente descritto.

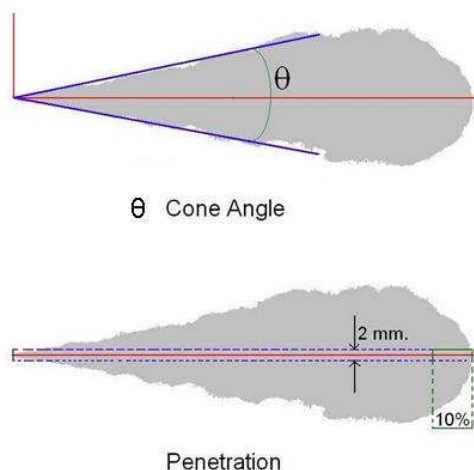
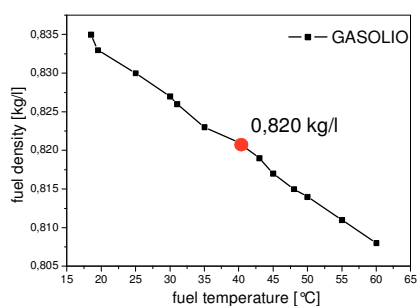


Fig. V.3: Parametri macroscopici dello spray: lunghezza di penetrazione e angolo di cono

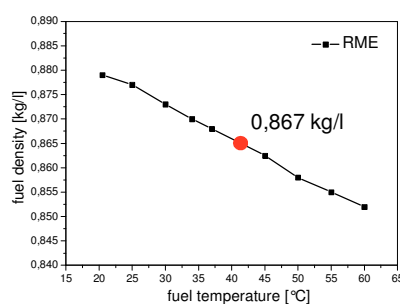
V.2. Analisi del fuel injection rate

Il primo combustibile testato è stato il gasolio, nelle condizioni operative di temperatura di $40^{\circ}C$ a cui corrisponde una densità pari a $0,820 \text{ kg/l}$.

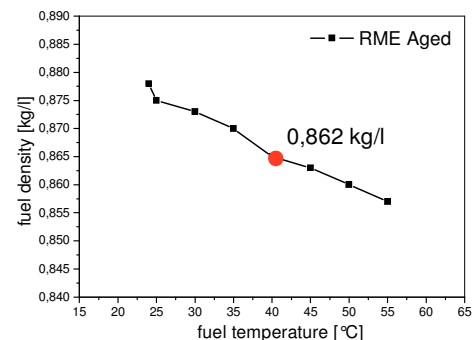
A tal riguardo è stata ricavata sperimentalmente la curva di densità al variare della temperatura (Fig. V.3.a) in modo da poter associare la corretta densità al regime di temperatura del test. Analogamente è stato fatto per il biodiesel (figg.V4.b e V.4.c).



a: Gasolio

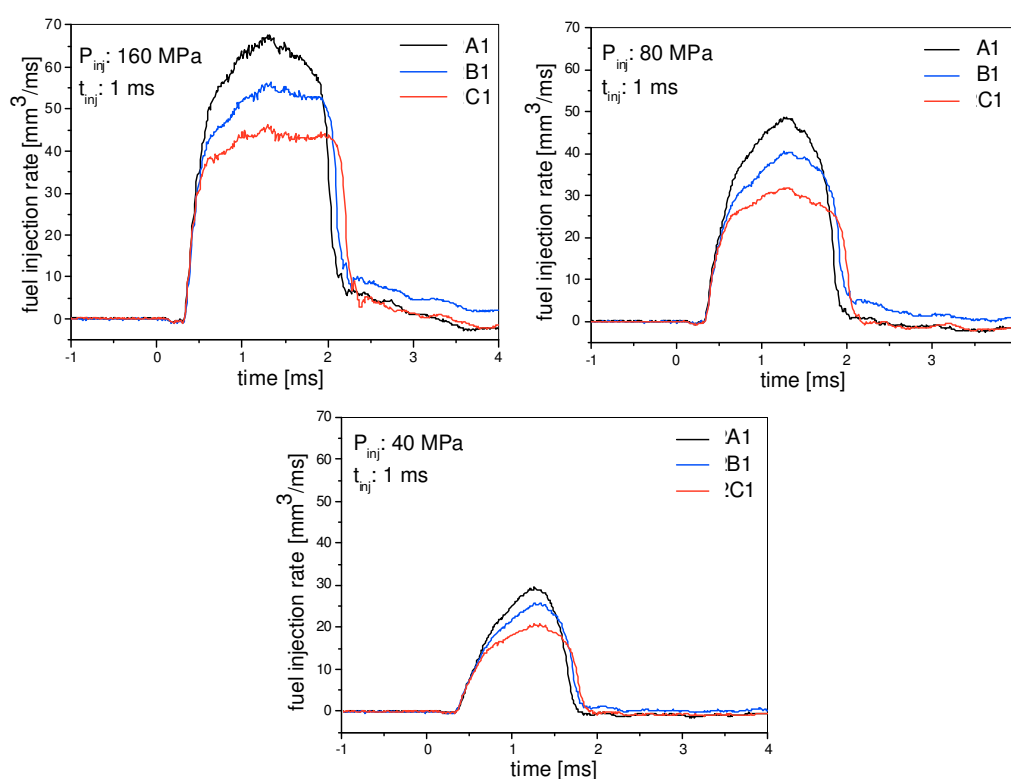


b: RME.



c: RME invecchiato

Fig. V.4 Curve di densità dei combustibili testati


 Fig. V.5: Per il Gasolio: Andamenti del fuel injection rate in funzione del tempo per gli iniettori A, B e C al variare di p_{inj} con $ET = 1000 \mu s$.

Nella figura V.5 sono messe a confronto le evoluzioni temporali delle portate istantanee di tutti e tre gli iniettori con ET fissato a $1000 \mu s = 1 \text{ ms}$ a ciascuna pressione d'iniezione.

Da essa si evince che all'aumentare della pressione d'iniezione aumenta la portata istantanea; comportamento prevedibile se si pensa che a parità di pressione in camera, a una pressione d'iniezione maggiore corrisponde una velocità maggiore fissato Δt . Notiamo che a pressione d'iniezione fissata, al diminuire del flussaggio dell'iniettore aumenta la durata dell'iniezione. Infatti, il pozzetto ("sac") in tutti gli

iniettori ha lo stesso volume mentre i fori hanno diametro diverso. Ciò implica che al decrescere del diametro il combustibile, essendo un fluido incomprimibile, impiega più tempo a fuoriuscire e svuotare il pozzetto. Inoltre al diminuire della sezione di efflusso diminuisce il valore di portata istantanea, tale risultato però facilmente riconducibile alle leggi di portata di un condotto soggetto a variazione di pressione tra monte e valle. Infine calcolando l'integrale del fuel injection rate si può constatare che sia mantenendo costante la pressione d'iniezione e diminuendo il diametro dei fori, sia fissando l'iniettore, quindi la sezione totale di efflusso, e diminuendo la pressione d'iniezione, la quantità iniettata di combustibile in termini volumetrici diminuisce.

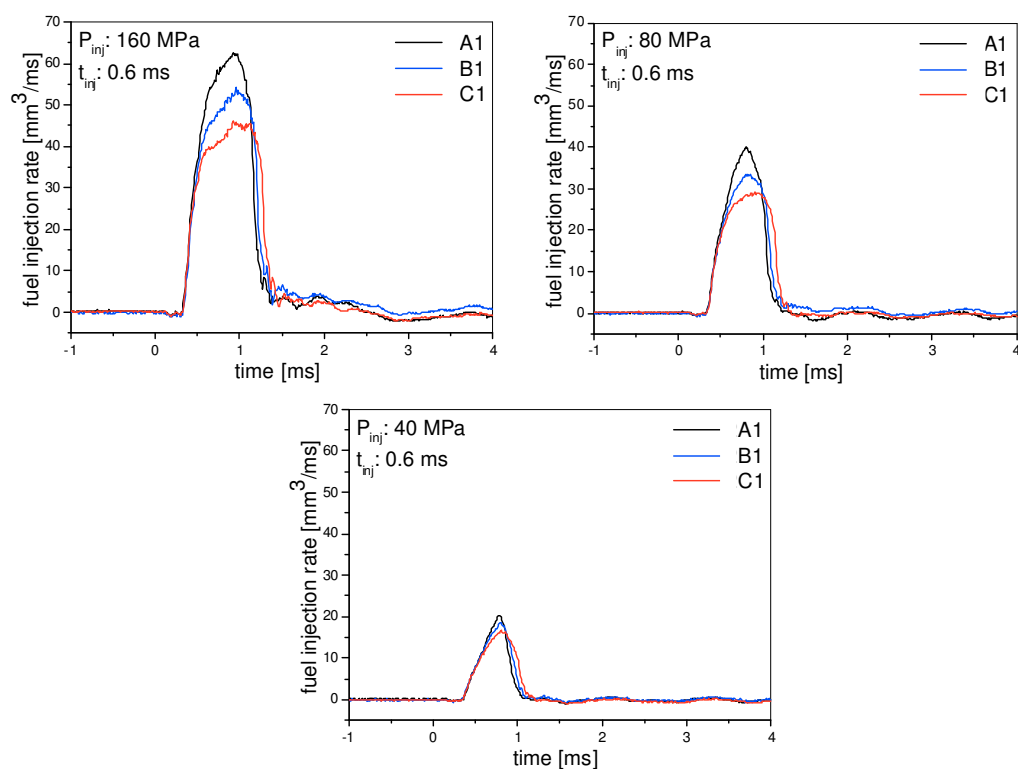


Fig. V.6: Gasolio: Andamenti del fuel injection rate in funzione del tempo per gli iniettori A, B e C al variare di p_{inj} con $ET = 600 \mu\text{s}$.

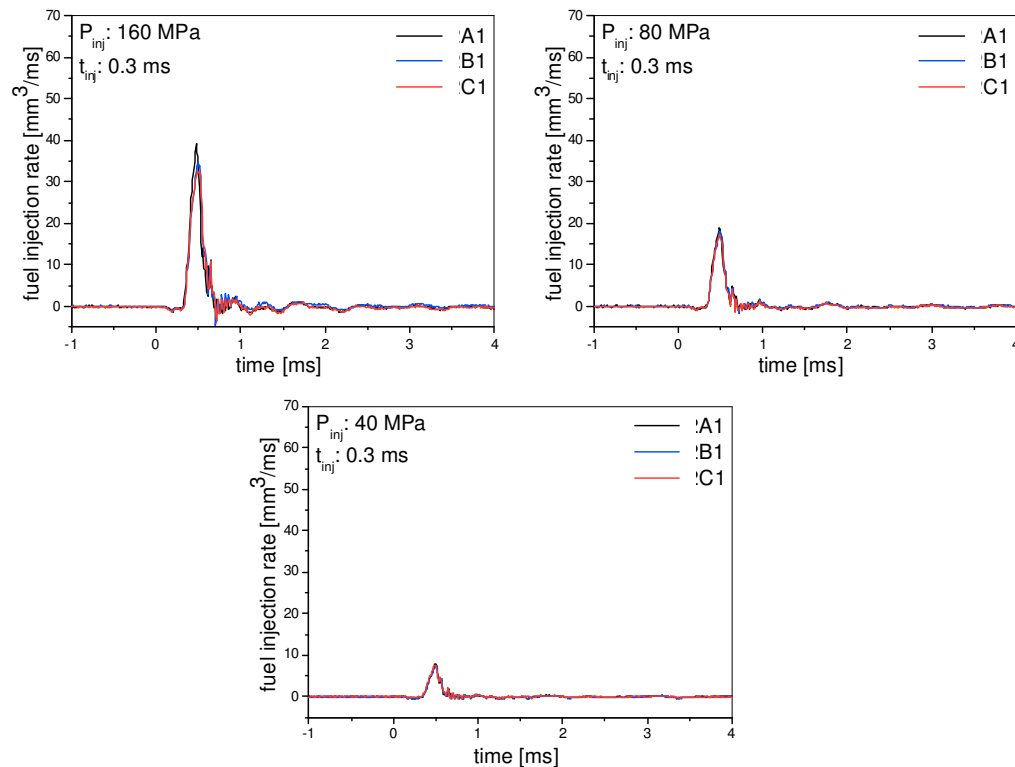


Fig. V.7: Gasolio: Andamenti del fuel injection rate in funzione del tempo per gli iniettori A, B e C al variare di p_{inj} con $ET = 300 \mu s$

Per ET pari a $600 \mu s$ (Fig. V.6) il comportamento degli iniettori è analogo a quello visto con ET pari a $1000 \mu s$. Si nota che a parità di pressione d'iniezione e di iniettore la diminuzione dell' ET comporta la diminuzione delle durate delle iniezioni, dei valori massimi di portate istantanee e delle quantità iniettate. Ciò è legato al fatto che tali grandezze sono influenzate dalla durata del tempo d'eccitazione del solenoide. Si può notare dalla figura che le pendenze delle rampe di salita e di discesa della portata istantanea non subiscono apprezzabili variazioni. Ciò è anche prevedibile se si pensa che tali parametri sono influenzati solo dalla geometria dell'iniettore e dalla pressione d'iniezione. Infine notiamo che, a causa dei brevi tempi a disposizione dello sviluppo del moto, viene a mancare il *plateau* centrale a pendenza nulla.

Se diminuiamo ulteriormente l' ET a $300 \mu s$ (Fig. V.7), gli andamenti delle portate istantanee nei tre iniettori sono praticamente sovrapponibili ad 80 ed a 40 MPa, mentre a 160 MPa la curva relativa all'iniettore con il flussaggio maggiore è leggermente più alta. In ogni caso però le durate complessive delle iniezioni coincidono. Ciò è legato al fatto che, a causa del ridotto ET , lo spillo non fa in tempo a completare la corsa utile che già deve chiudersi. Infatti tali dinamiche sono governate dalle inerzie dell'iniettore, dalla pressione d'iniezione in gioco e dalla sezione di efflusso. L'effetto della sezione d'efflusso non riesce però a palesarsi perché ha un'influenza esclusivamente sulla parte finale della rampa di salita, evidente quando ET è pari a

1000 ed a 600 μs , mentre è praticamente assente a 300 μs . Analogamente nella rampa di discesa siccome il moto non si è sviluppato, il fluido si trova nelle condizioni di flusso simili alle fasi finali delle iniezioni a 1000 ed a 600 μs in cui non ha peso il diverso diametro dei fori, bensì solo la pressione d'iniezione.

Raggruppando le 3 figure precedenti (dalla V.5 alla V.7) otteniamo la figura V.8. Essa evidenzia, sempre per il gasolio, in orizzontale la variazione del fuel injection rate in funzione della pressione di iniezione, fissato la durata di iniezione ET. In verticale mostra la variazione del fuel injection rate in funzione della durata di iniezione ET fissato il valore della pressione di iniezione.

A parità di ET, e al decrescere del valore di pressione, si osserva una diminuzione del picco di portata istantanea e delle quantità iniettate.

A parità di pressione e al decrescere di ET, si confermano una diminuzione delle durate delle iniezioni, dei picchi di portate istantanee (solo per $t_{inj} = 0,3 \text{ ms}$) e delle quantità iniettate

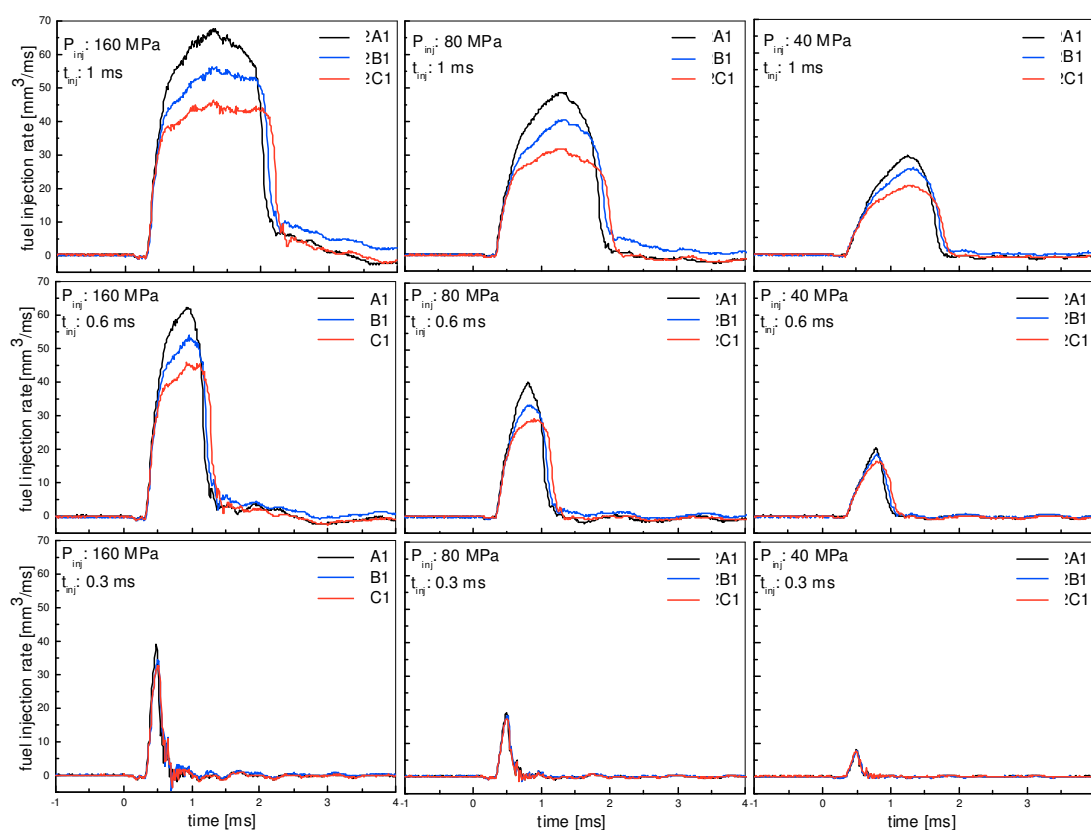


Fig. V.8 : Riepilogo degli andamenti del fuel injection rate in funzione del tempo per il gasolio

Vengono riportate di seguito le immagini riepilogative per l'RME (Fig.V.9) ed RME invecchiato (Fig.V.10).

Essa evidenziano, al pari della Fig.V.8, in orizzontale la variazione del fuel injection rate in funzione della pressione di iniezione, fissato la durata di iniezione ET, mentre in verticale la variazione del fuel injection rate in funzione della durata di iniezione ET fissato il valore della pressione di iniezione.

Dal confronto delle figure V.8, V.9, e V.10 e quindi al variare del combustibile, per condizioni di funzionamento omologhe non si apprezzano differenze sostanziali sia nelle forme d'onda del fuel injection rate, sia in termini di quantità iniettate benché le proprietà chimico fisiche siano variate, come peraltro evidenziato sia dalle curve di densità ricavate sperimentalmente per i tre combustibili (figg. V.4) che dalle specifiche degli stessi riportate nel capitolo IV.

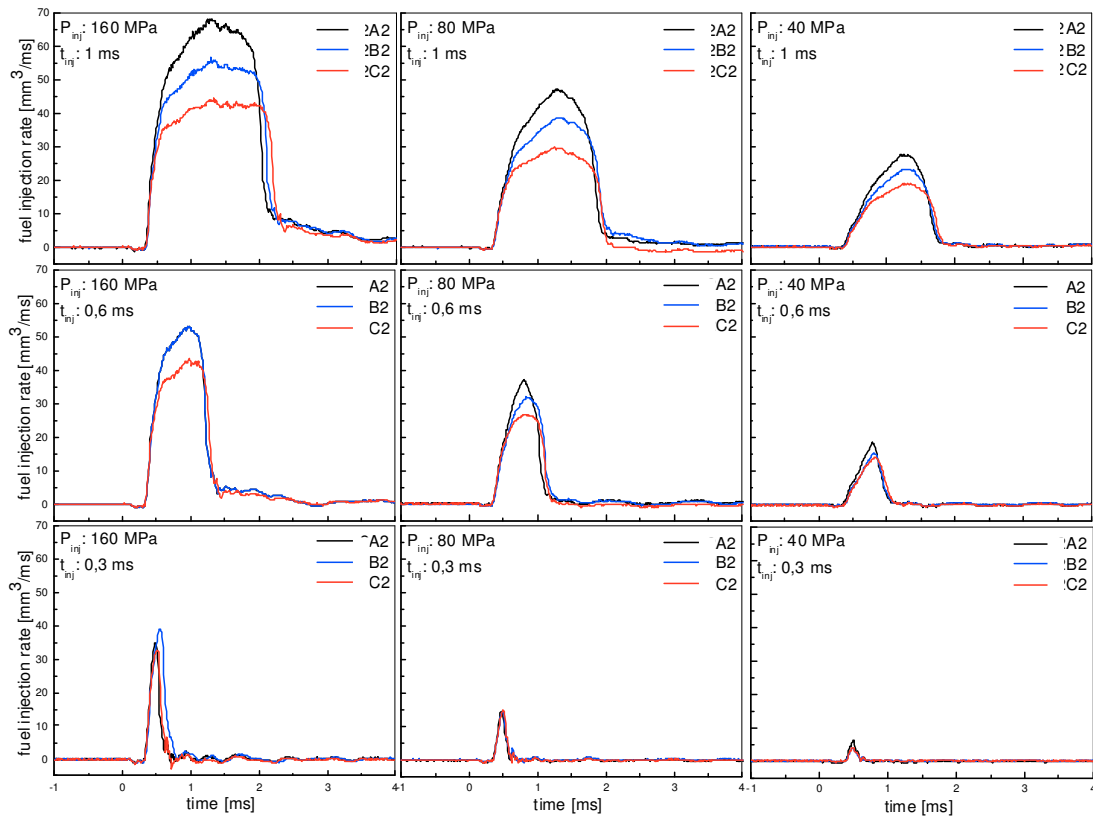


Fig. V.9 : Riepilogo degli andamenti del fuel injection rate in funzione del tempo per il biodiesel RME

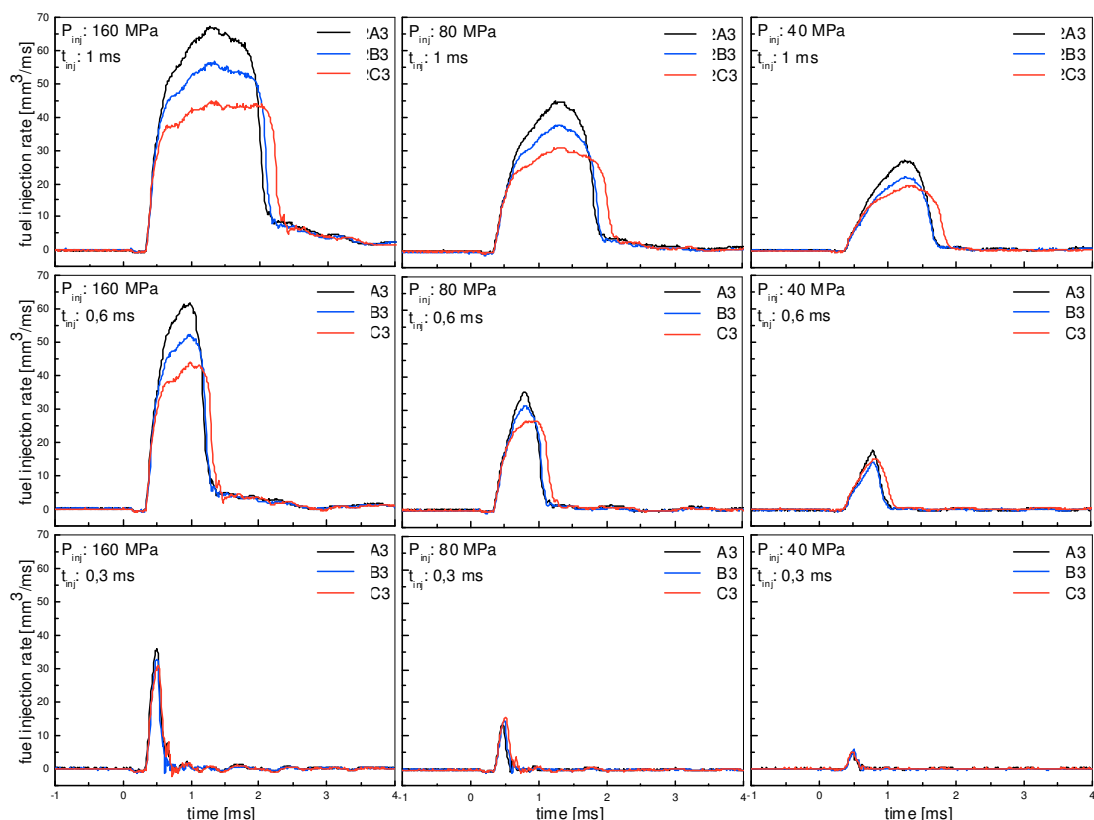


Fig. V.10 : Riepilogo degli andamenti del fuel injection rate in funzione del tempo per il biodiesel RME invecchiato.

V.3. Analisi della portata totale

	P_{inj}/t_{inj} [bar]/[μs] 1600/1000	P_{inj}/t_{inj} [bar]/[μs] 1600/600	P_{inj}/t_{inj} [bar]/[μs] 1600/300	P_{inj}/t_{inj} [bar]/[μs] 800/1000	P_{inj}/t_{inj} [bar]/[μs] 800/600	P_{inj}/t_{inj} [bar]/[μs] 800/300	P_{inj}/t_{inj} [bar]/[μs] 400/1000	P_{inj}/t_{inj} [bar]/[μs] 400/600	P_{inj}/t_{inj} [bar]/[μs] 400/300	
Q_{inj} [mm³/str]	96,67	42,64	5,80	56,21	20,18	2,85	26,39	7,69	0,99	Injector A1
RMS	1,28	0,95	0,72	0,36	0,08	0,02	0,11	0,83	0,02	
Q_{inj} [mm³/str]	86,32	39,27	5,53	51,03	19,16	2,69	25,51	7,65	1,02	Injector B1
RMS	0,75	1,51	0,14	0,88	0,15	0,06	0,20	0,02	0,04	
Q_{inj} [mm³/str]	76,51	36,41	5,56	43,54	19,16	2,56	22,16	7,83	1,05	Injector C1
RMS	1,49	0,56	0,10	0,04	0,29	0,03	0,18	0,05	0,02	
Q_{inj} [mm³/str]	96,94	40,30	5,32	54,17	17,93	1,91	24,39	6,48	0,77	Injector A2
RMS	0,35	0,85	0,14	0,08	0,09	0,11	0,11	0,08	0,01	
Q_{inj} [mm³/str]	85,35	38,07	8,70	47,99	18,24	1,83	21,19	5,66	0,44	Injector B2
RMS	0,42	0,42	0,41	0,21	0,29	0,11	0,40	0,14	0,02	
Q_{inj} [mm³/str]	72,36	33,19	5,84	38,28	15,51	1,97	18,84	5,87	0,47	Injector C2
RMS	0,27	0,66	0,13	0,39	0,68	0,07	0,13	0,01	0,01	
Q_{inj} [mm³/str]	94,29	40,94	5,37	48,69	16,91	1,58	23,13	5,89	0,52	Injector A3
RMS	0,90	0,97	0,57	2,53	0,29	0,03	0,17	0,06	0,03	
Q_{inj} [mm³/str]	84,70	36,98	4,57	45,62	15,96	1,88	19,00	4,84	0,70	Injector B3
RMS	2,58	0,63	0,05	0,58	0,22	0,07	0,45	0,07	0,01	
Q_{inj} [mm³/str]	75,38	35,02	5,34	42,98	17,25	2,43	21,25	6,76	0,67	Injector C3
RMS	0,38	0,57	0,50	0,43	0,18	0,16	0,16	0,10	0,07	

Tab. V 1: Quantità iniettata per strategie di iniezione

La tabella V.1 mostra per ogni coppia iniettore/combustibile e per ogni strategia di prova la portata totale media iniettata per “colpo”. Essa è stata calcolata sulle 5 misure effettuate per ogni strategia di prova (o condizioni di iniezione) effettuata.

Viene altresì mostrato lo scarto quadratico medio (RMS) o deviazione standard del valore misurato.

Ricordando che lo scarto quadratico medio serve a quantificare l'intervallo dei valori misurati di una grandezza, possiamo affermare che i trovati inferiori all'unità o poco superiori, dimostrano una buona stabilità del sistema di iniezione.

La tabella V.2 mostra l'analisi fatta, in termini di differenza di portate, per ogni iniettore, per i combustibili testati e al variare delle strategie di prova.

	P_{ij}/t_{ij} [bar]/[ms] 1600/1000	P_{ij}/t_{ij} [bar]/[ms] 1600/600	P_{ij}/t_{ij} [bar]/[ms] 1600/300	P_{ij}/t_{ij} [bar]/[ms] 800/1000	P_{ij}/t_{ij} [bar]/[ms] 800/600	P_{ij}/t_{ij} [bar]/[ms] 800/300	P_{ij}/t_{ij} [bar]/[ms] 400/1000	P_{ij}/t_{ij} [bar]/[ms] 400/600	P_{ij}/t_{ij} [bar]/[ms] 400/300
Analisi per l'iniettore A									
Injector A1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Injector A2	0.27	-2.34	-0.48	-2.03	-2.24	-0.94	-2.00	-1.21	-0.22
Injector A3	-2.37	-1.70	-0.43	-7.51	-3.26	-1.27	-3.26	-1.81	-0.47
Scarto massimo in valore assoluto	2.37	2.34	0.48	7.51	3.26	1.27	3.26	1.81	0.47
Scarto massimo % rispetto la portata di gasolio	2.45%	5.49%	8.25%	13.36%	16.17%	44.44%	12.35%	23.48%	47.47%
Iniettore con scarto massimo	Injector A3	Injector A2	Injector A2	Injector A3	Injector A3	Injector A3	Injector A3	Injector A3	Injector A3
Analisi per l'iniettore B									
Injector B1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Injector B2	-0.97	-1.20	3.17	-3.04	-0.93	-0.87	-4.31	-1.99	-0.58
Injector B3	-1.61	-2.29	-0.96	-5.41	-3.21	-0.81	-6.51	-2.81	-0.32
Scarto massimo in valore assoluto	1.61	2.29	3.17	5.41	3.21	0.87	6.51	2.81	0.58
Scarto massimo % rispetto la portata di gasolio	1.87%	5.82%	57.36%	10.61%	16.73%	32.18%	25.51%	36.78%	56.86%
Iniettore con scarto massimo	Injector B3	Injector B3	Injector B2	Injector B3	Injector B3	Injector B2	Injector B3	Injector B3	Injector B2
Analisi per l'iniettore C									
Injector C1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Injector C2	-4.15	-3.22	0.28	-5.26	-3.65	-0.59	-3.33	-1.96	-0.58
Injector C3	-1.13	-1.39	-0.22	-0.56	-1.91	-0.13	-0.92	-1.07	-0.38
Scarto massimo in valore assoluto	4.15	3.22	0.28	5.26	3.65	0.59	3.33	1.96	0.58
Scarto massimo % rispetto la portata di gasolio	5.42%	8.84%	4.97%	12.07%	19.03%	23.05%	15.01%	25.04%	55.56%
Iniettore con scarto massimo	Injector C2	Injector C2	Injector C2	Injector C2	Injector C2	Injector C2	Injector C2	Injector C2	Injector C2

Tab. V.2: Analisi dello scarto di portata di biodiesel rapportata alla portata di gasolio

Come previsto gli scarti maggiori tra le portate medie di combustibili si riscontrano per il minimo tempo di energizzazione, 0,3 ms, e, a meno di un caso, per il valore di pressione minore 40 MPa. Questo fenomeno è indice che per basse pressioni e/o tempi di energizzazione brevi il sistema di iniezione è meno stabile. Fissato l'iniettore A e variando il combustibile, si osserva una diminuzione di portata con l'RME invecchiato (max 47,47% in condizioni di $p_{inj}/ET = 400/300$). Fissato l'iniettore B e variando il combustibile, si osserva una diminuzione di portata con l'RME invecchiato (max 56,86 in condizioni di $p_{inj}/ET = 1600/300$); Fissato l'iniettore C e variando il combustibile, si osserva una diminuzione di portata con l'RME (max 55,56 in condizioni di $p_{inj}/ET = 400/300$).

Le figure V.11.a, V.11.b e V.11.c mostrano il confronto tra le portate medie dei 3 combustibili testati in funzione delle strategie di prova.

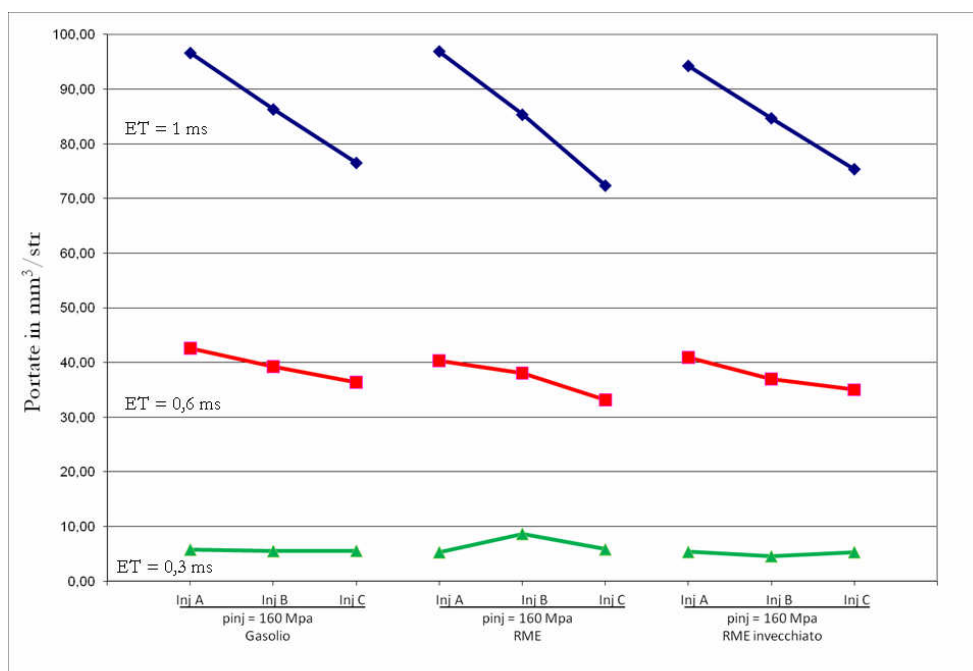


Fig. V.11.a: Andamento della portata media per strategia di prove:
 $p_{inj} = 160 \text{ MPa}$ ed $ET = 1,0 - 0,6 - 0,3 \text{ ms}$

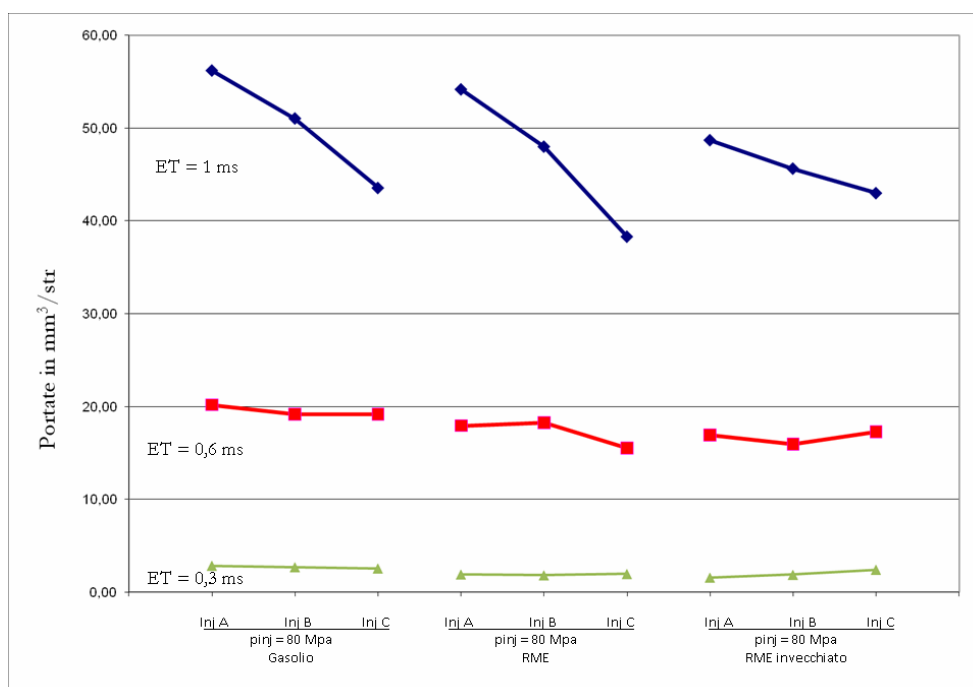


Fig. V.11.b: Andamento della portata media per strategia di prove:
 $p_{inj} = 80 \text{ MPa}$ ed $ET = 1,0 - 0,6 - 0,3 \text{ ms}$

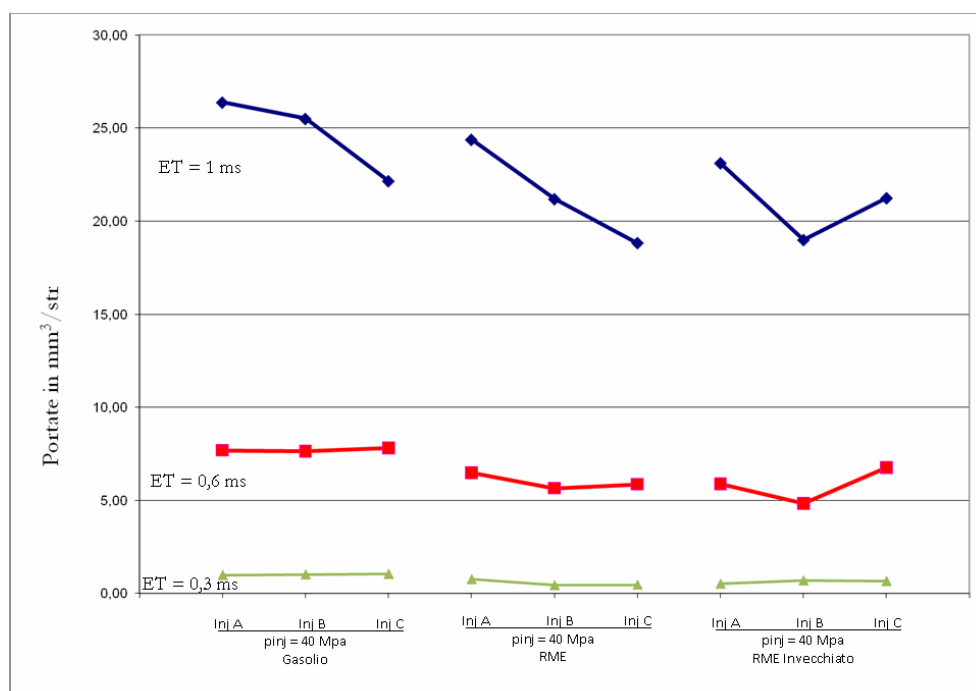


Fig. V.11.c: Andamento della portata media per strategia di prove:
 $p_{inj} = 40 \text{ MPa}$ ed $ET = 1,0 - 0,6 - 0,3 \text{ ms}$

L'apparato di iniezione mostra una sua intrinseca stabilità per pressioni di iniezione elevate e tempi lunghi di energizzazione.

Le quantità di biodiesel iniettato, per valori di pressione e tempi di energizzazione alti, è inferiore al corrispondente valore di gasolio minerale. Questo comportamento lo si attribuisce alla maggiore viscosità cinematica del biodiesel rispetto il gasolio, avendo eseguito le prove alle stesse condizioni di temperatura di iniezione (40°C).

Lo stesso comportamento non è confermato per valori di pressione bassi e tempi di energizzazione brevi. Il sistema di iniezione mostra un comportamento più instabile.

Le figure V.12.a, V.12.b e V.12.c mostrano l'andamento della portata media in funzione del combustibile iniettato per ogni strategia di prove fissato l'iniettore.

Si evince che la portata media del combustibile, rispetta il flussaggio degli iniettori testati, indipendentemente dal combustibile utilizzato.

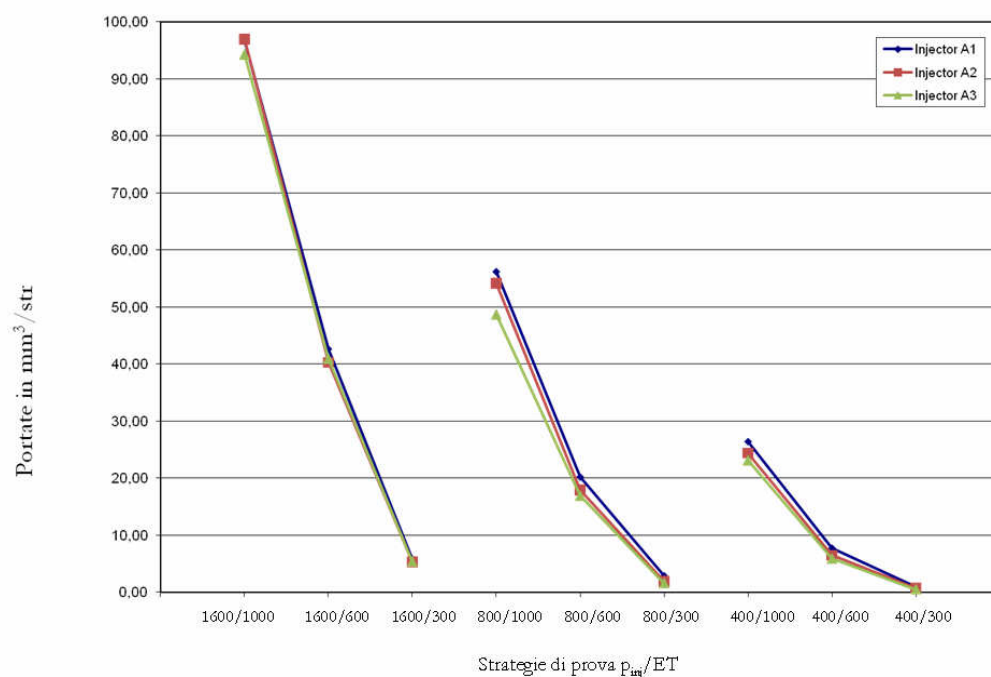


Fig. V.12.a: Andamento della portata media per l'iniettore a flussaggio maggiore in funzione del combustibile per ogni strategia di prova.

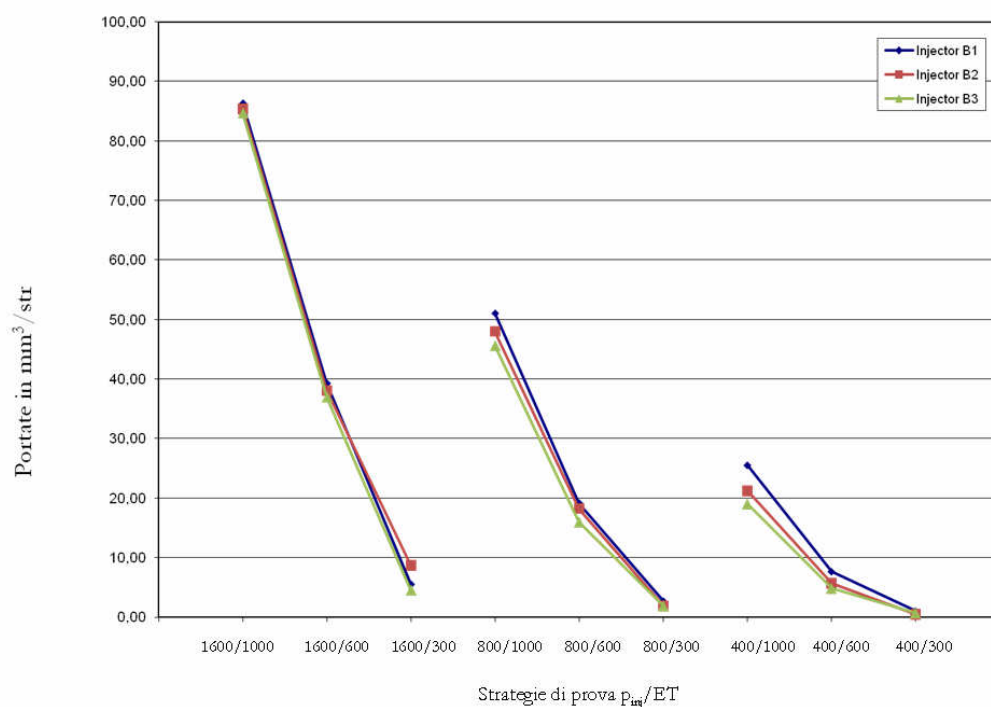


Fig. V.12.b: Andamento della portata media per l'iniettore a flussaggio maggiore in funzione del combustibile per ogni strategia di prova.

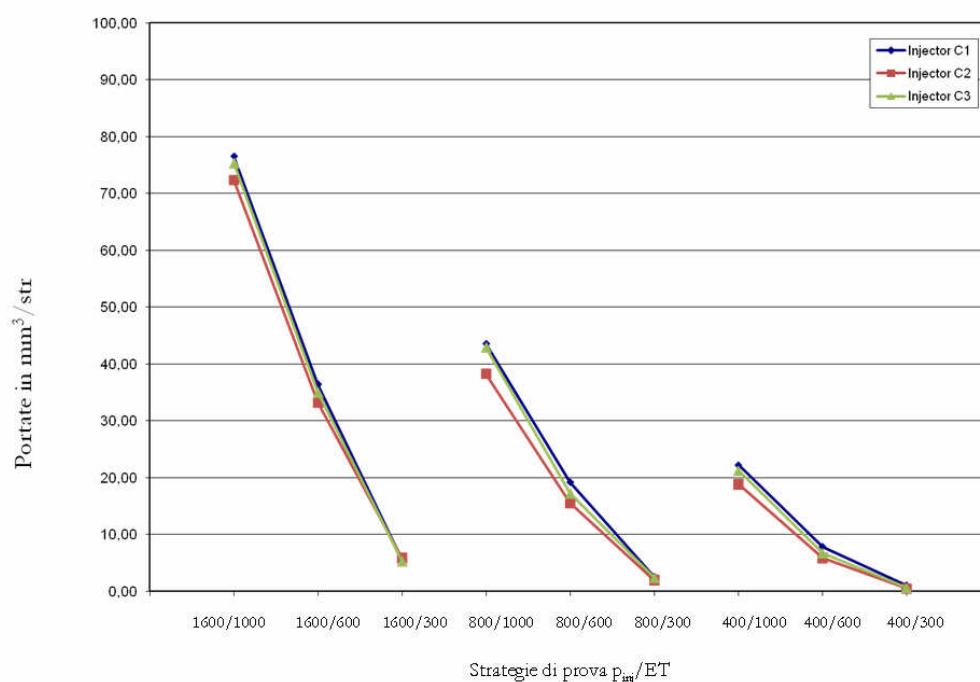


Fig. V.12.c: Andamento della portata media per l'iniettore a flussaggio maggiore in funzione del combustibile per ogni strategia di prova.

V.4. Analisi delle Curve di penetrazione

Con la procedura precedentemente descritta sono state acquisite e quindi analizzate le immagini dei getti ai diversi istanti dall'inizio dell'iniezione per ogni strategia di prova.

Le figure V.13.a e V.13.b mostrano l'andamento spaziale degli spray in funzione del tempo a partire da $t_0 = 30 \mu s$ per l'iniettore a flussaggio maggiore ("A") utilizzando gasolio alle condizioni di pressione di 160 MPa ed ET di 0,8 ms.

Si riportano solo 3 delle 5 immagini acquisite a 30, 50, 100, 200, (Fig.V.12.a), 300, 500, e 800 μs (Fig.V.12.b).

Dalle immagini si evince una buona stabilità e ripetibilità dell'evento iniezione.

Gli spray evolvono in camera in maniera regolare raggiungendo una simile lunghezza di penetrazione ad ogni step di acquisizione.

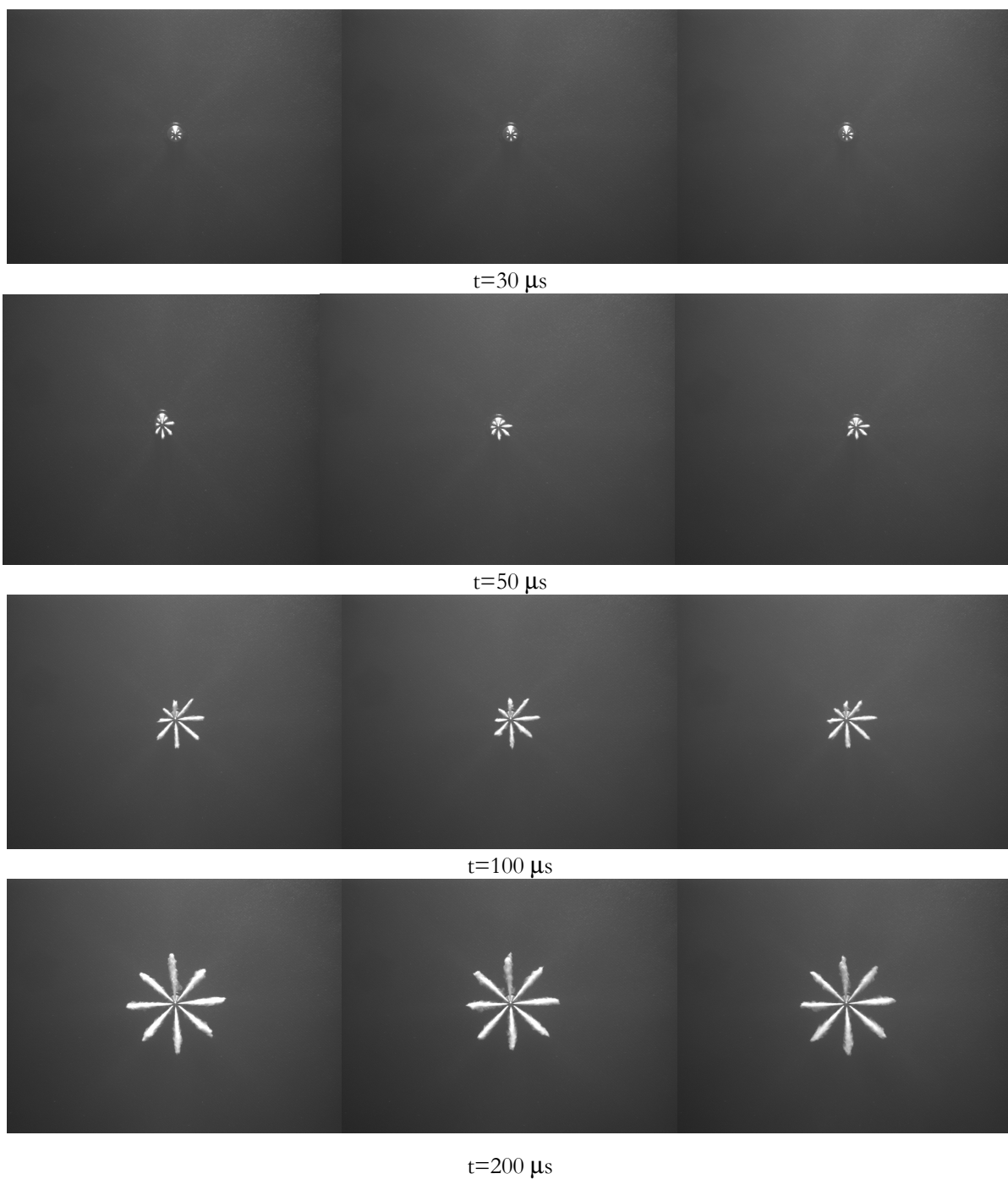


Fig. V.13.a: Evoluzione spazio-temporale dei getti per la coppia A1 per $p_{inj} = 160$ MPa

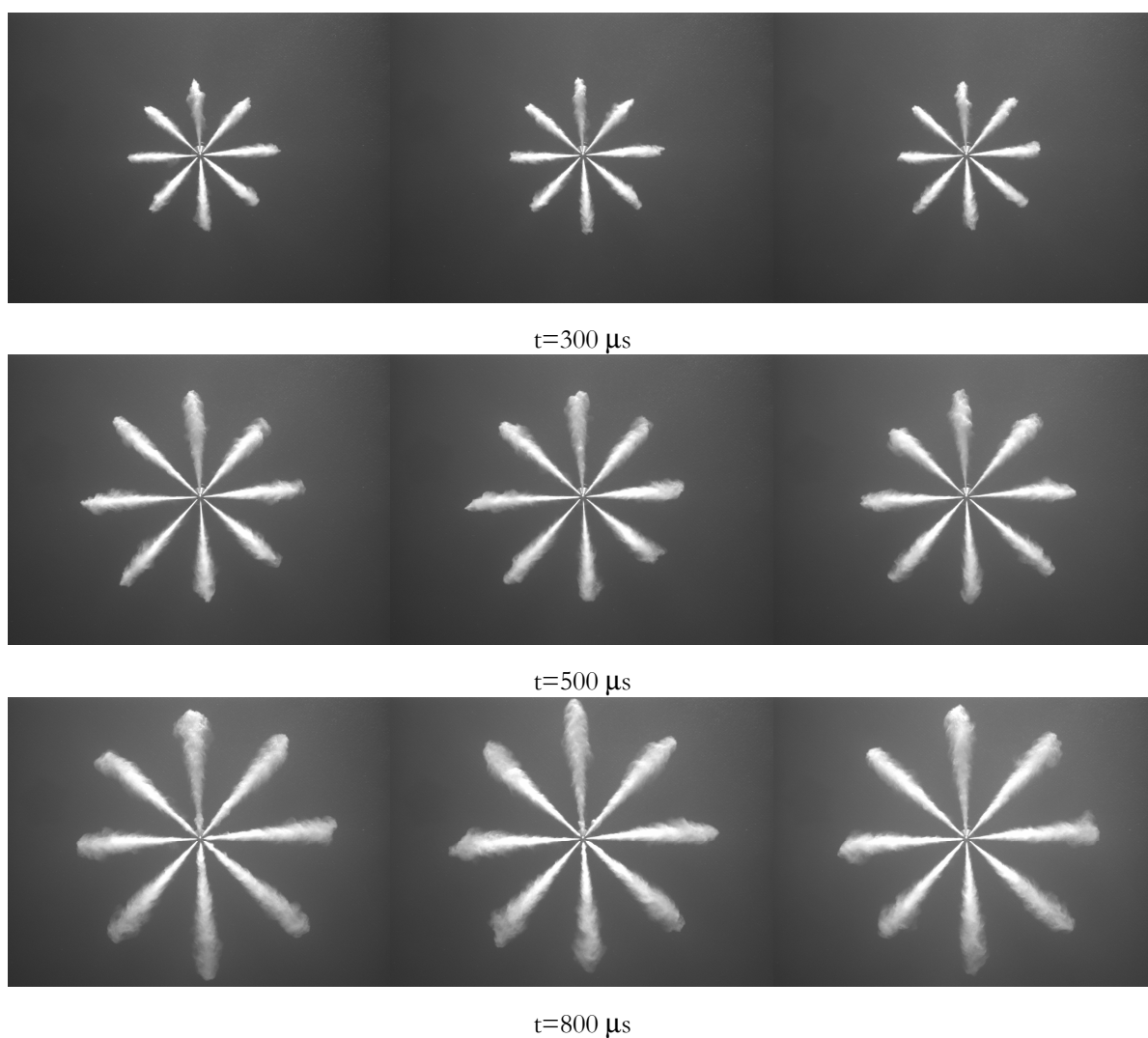


Fig. V 13.b: Evoluzione spazio-temporale dei getti per la coppia A1 per $p_{inj} = 160 \text{ MPa}$

In tabella V.3 vengono riportati per la strategia di prova A1-1600-600 i valori delle penetrazioni dei singoli getti di combustibile e per 3 immagini acquisite ai successivi step di iniezione. Dai valori calcolati ed in particolare l'ordine di grandezza dello scarto quadratico medio della media delle lunghezze di penetrazione, dimostra le minime differenze che ci sono in termini di penetrazione tra gli 8 getti e quindi la stabilità del sistema di iniezione.

<i>Time [μs]</i>	getto-1	getto-2	getto-3	getto-4	getto-5	getto-6	getto-7	getto-8
50	2,070	2,660	4,640	4,840	4,540	3,060	2,070	1,970
	2,170	2,370	4,450	4,820	4,350	3,550	1,870	2,070
	2,170	2,370	4,450	4,540	4,350	4,250	2,170	2,170
mean	2,137	2,467	4,513	4,733	4,413	3,620	2,037	2,070
rms	0,058	0,167	0,110	0,168	0,110	0,598	0,153	0,100
100	7,910	10,490	11,280	10,780	11,570	8,700	5,730	5,930
	7,220	10,290	10,880	11,770	11,380	10,580	7,020	5,930
	6,920	9,300	11,770	12,070	10,880	9,890	7,220	5,930
mean	7,350	10,027	11,310	11,540	11,277	9,723	6,657	5,930
rms	0,508	0,637	0,446	0,675	0,356	0,951	0,809	0,000
200	19,990	19,500	19,100	19,990	18,310	18,700	17,510	18,700
	19,500	17,710	19,790	19,590	20,090	19,500	19,300	18,210
	18,900	18,900	19,300	20,580	20,580	20,490	18,110	18,800
mean	19,463	18,703	19,397	20,053	19,660	19,563	18,307	18,570
rms	0,546	0,911	0,355	0,498	1,195	0,897	0,911	0,316
300	26,720	25,930	28,110	26,820	27,420	26,030	25,440	25,930
	26,330	26,030	27,910	26,030	26,520	26,030	25,240	25,440
	25,530	25,930	25,530	27,220	25,930	26,820	23,750	24,740
mean	26,193	25,963	27,183	26,690	26,623	26,293	24,810	25,370
rms	0,607	0,058	1,435	0,606	0,750	0,456	0,923	0,598
500	36,330	35,440	35,440	34,940	36,820	40,680	41,570	38,010
	37,220	35,240	37,020	36,620	36,720	41,570	41,970	40,580
	37,420	38,210	38,210	40,490	37,220	39,100	36,920	34,840
mean	36,990	36,297	36,890	37,350	36,920	40,450	40,153	37,810
rms	0,580	1,660	1,390	2,846	0,265	1,251	2,807	2,875
800	48,800	47,420	47,610	47,120	47,120	48,900	47,320	47,510
	45,340	46,920	48,210	49,990	49,590	47,510	43,460	45,830
	47,610	48,410	46,520	48,600	47,420	45,340	45,730	46,430
mean	47,250	47,583	47,447	48,570	48,043	47,250	45,503	46,590
rms	1,758	0,758	0,857	1,435	1,348	1,794	1,940	0,851

Tabella V.3: Misure di penetrazione di Spray per la strategia di prova A1-1600-600

Quanto mostrato per l'iniettore a flussaggio maggiore e per il gasolio alle condizioni di iniezione di 160 MPa e per un ET di 0,6ms (= 600 μs) si ripete per gli altri iniettori e per tutte le strategie di prove, ed ancora per gli altri due combustibili testati: l'PRME e l'PRME invecchiato.

Una anomalia riscontrata durante le prove in camera è stata una disomogeneità nelle penetrazioni dei singoli getti negli istanti iniziali della loro evoluzione spazio-temporale che si ripete per i 3 combustibili e per i gli iniettori A e B, ovvero sia per quello a flussaggio maggiore e medio. Mentre, per l'iniettore a flussaggio minore, (iniettore C), l'anomalia non si presenta; i getti presentano una struttura uniforme già dai primi istanti.

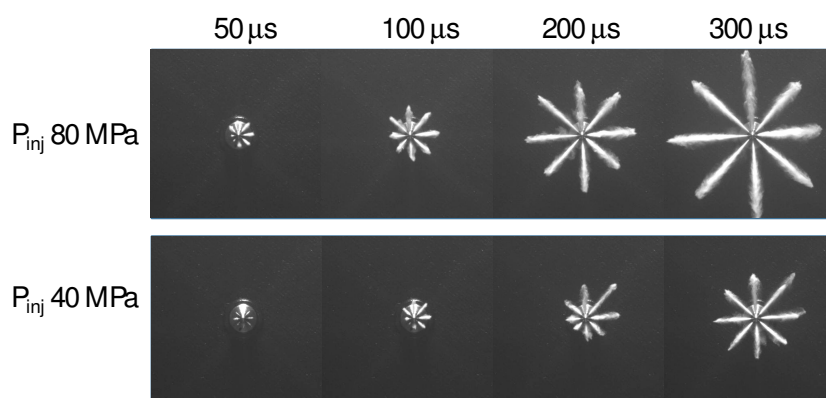


Fig. V.14: Evoluzione spazio-temporale dei getti per la coppia A1 in condizioni di iniezione: $p_{inj} = 80$ e 40 MPa

Confrontando le immagini della distribuzione spazio-temporale dei getti agli stessi istanti di acquisizione, rappresentati nelle figg V.13 e V.13, si osserva come il fenomeno di disomogeneità si presenta per tutti i valori di pressione analizzati.

In particolare, si può notare che per pressioni d'iniezione pari a 160 ed 80 MPa tale disomogeneità si attenua nel tempo fino ad estinguersi intorno ai 200 μ s, mentre sono necessari 300 μ s a 40 MPa.

Mostriamo di seguito l'evoluzione spazio-temporale in camera dei soli getti di gasolio, per gli iniettori a flussaggio medio e minore, in quanto le immagini, a meno di una irrilevante differenza di lunghezza di penetrazione, sono identiche per i biodiesel analizzati: RME ed RME invecchiato.

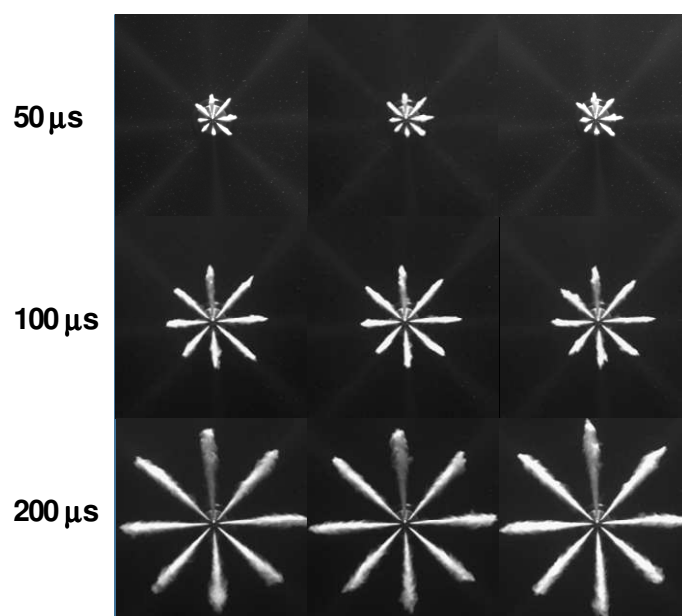


Fig. V.15: Evoluzione spazio-temporale dei getti per la coppia B1 con $p_{inj} = 160$ MPa.

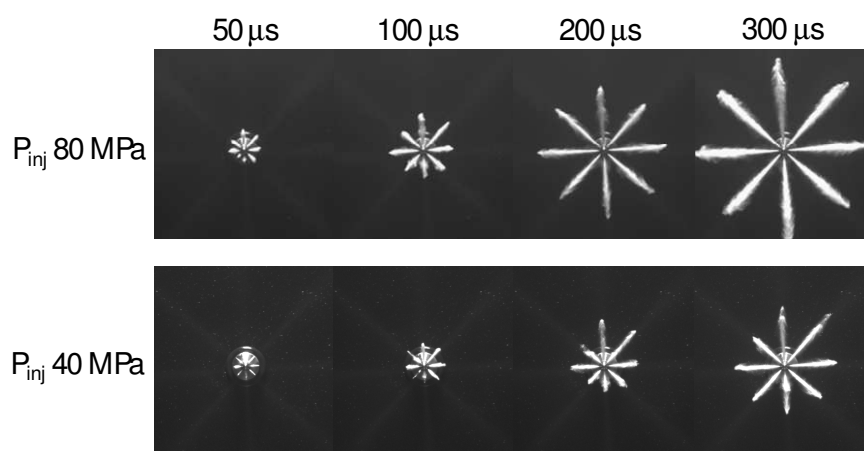


Fig. V.16: Evoluzione spazio-temporale dei getti per la coppia B1 in condizioni di iniezione: $p_{inj} = 80 \text{ MPa}$ e 40 MPa

Analoga disamina vale sempre l'iniettore a flussaggio medio ("B") alle stesse condizioni di iniezione (Figg.V.15 e V.16). Le figure V.17 e V.18 mostrano come il fenomeno di disomogeneità non si presenta per l'iniettore C per ogni condizione di iniezione, difatti i getti presentano una struttura uniforme già dai primi istanti.

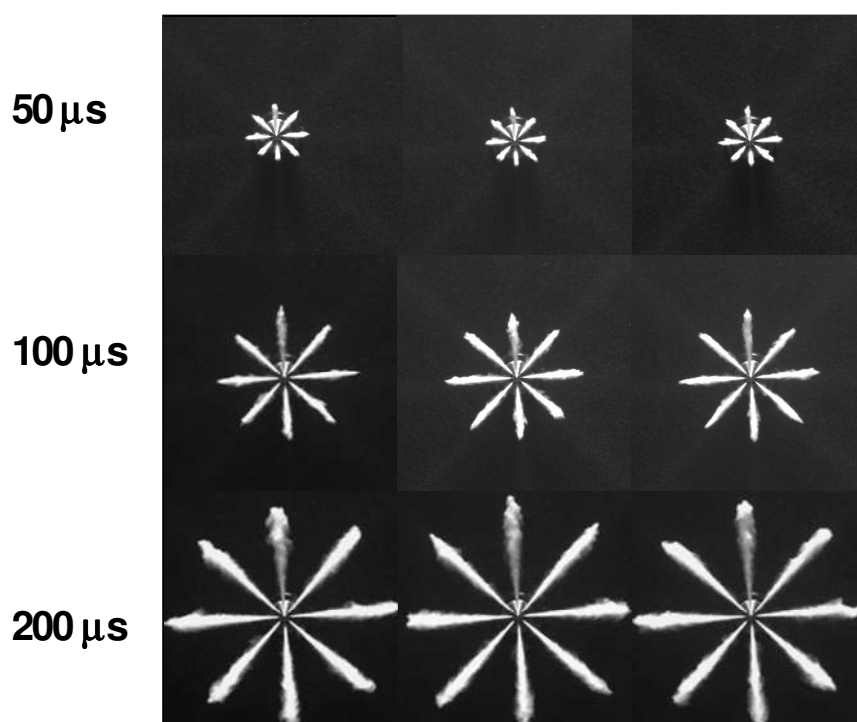


Fig. V.17: Evoluzione spazio-temporale dei getti per la coppia C1 in condizioni di iniezione: $p_{inj} = 160 \text{ MPa}$

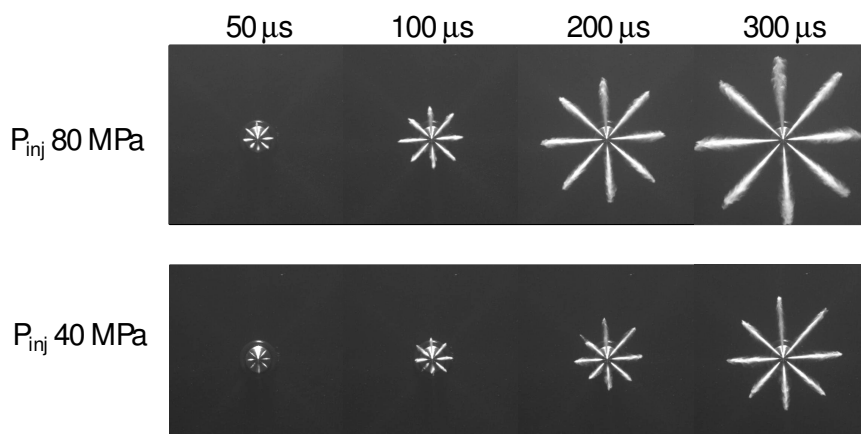


Fig. V.18: Evoluzione temporale dei getti per la coppia C1 in condizioni di iniezione: $p_{inj} = 80$ e 40 Mpa

Successivamente, sono stati calcolati i valori medi della penetrazione sugli 8 getti di ogni immagine acquisita in un dato istante e poi è stata calcolata la media sulle 5 immagini acquisite sempre allo stesso istante.

Si è così determinato per ogni strategia di prova la curva di penetrazione media. Diventa significativo rappresentare in diagramma i confronti tra le diverse curve di penetrazione media.

Le figure seguenti rappresentano, fissato il combustibile e l'iniettore, la curva di penetrazione media, al variare della pressione di iniezione e del periodo di energizzazione ET.

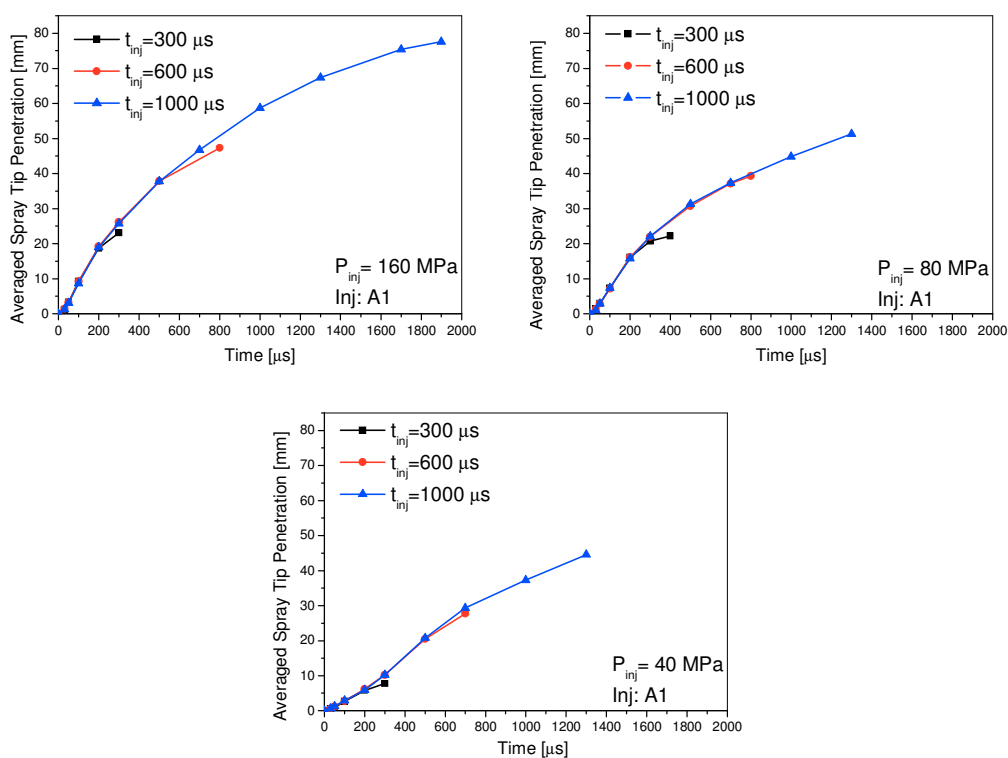


Fig. V.19: Curve di penetrazione media per la coppia A1

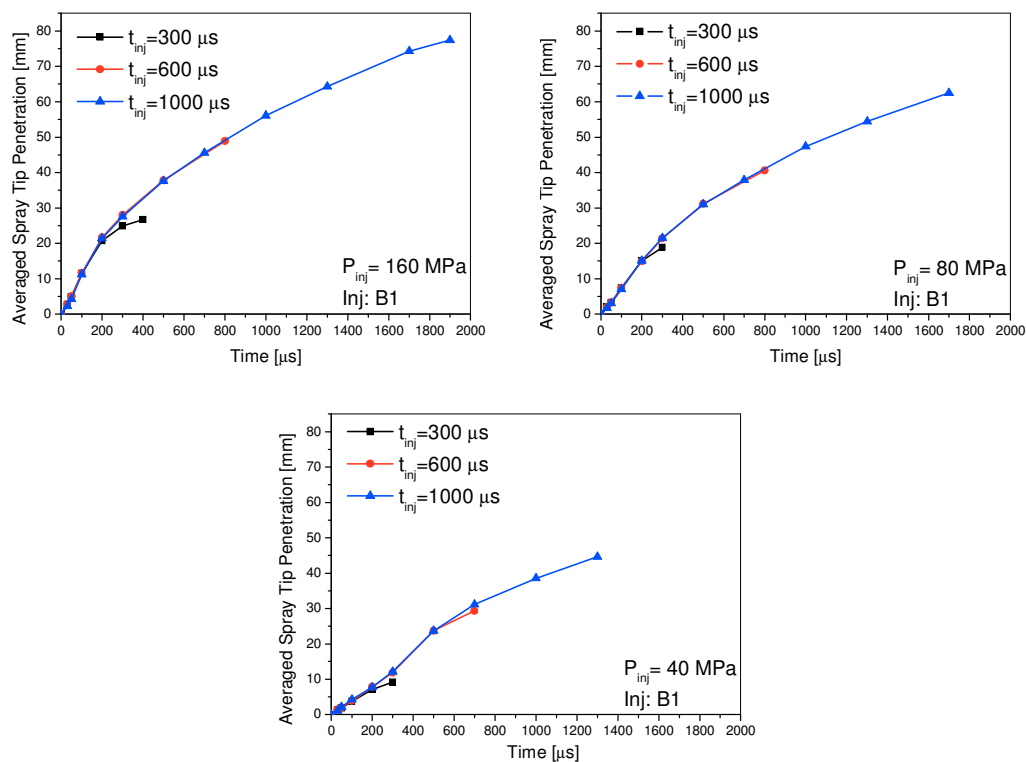


Fig. V.20: Curve di penetrazione media per l'iniettore B1

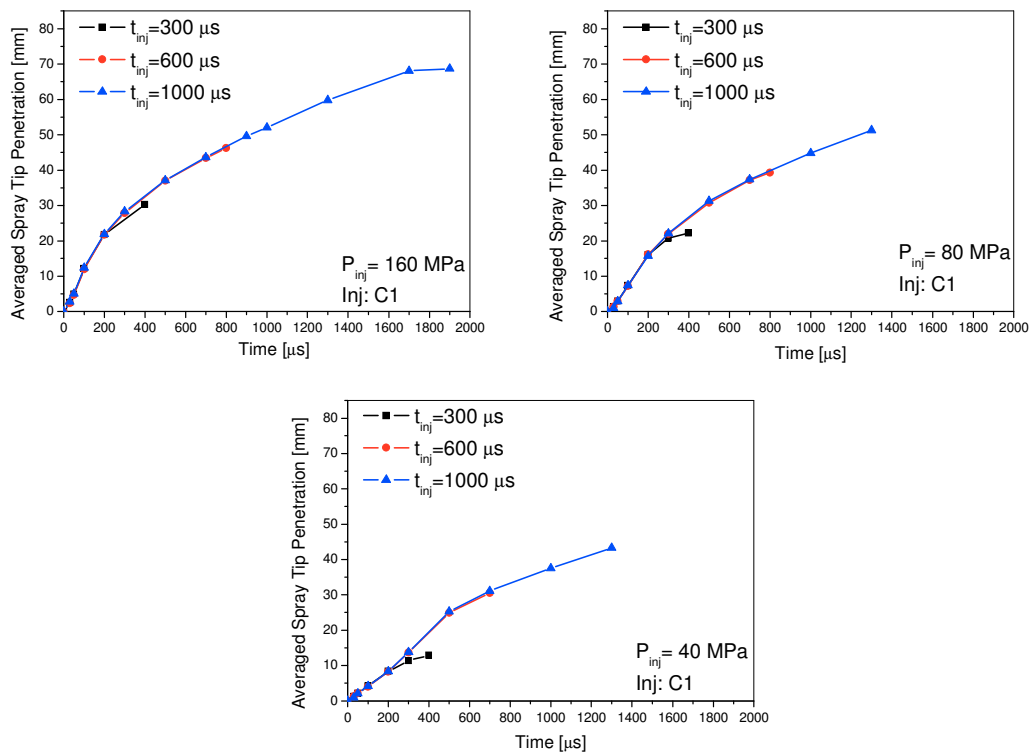


Fig. V.21: Curve di penetrazione media per l'iniettore C1

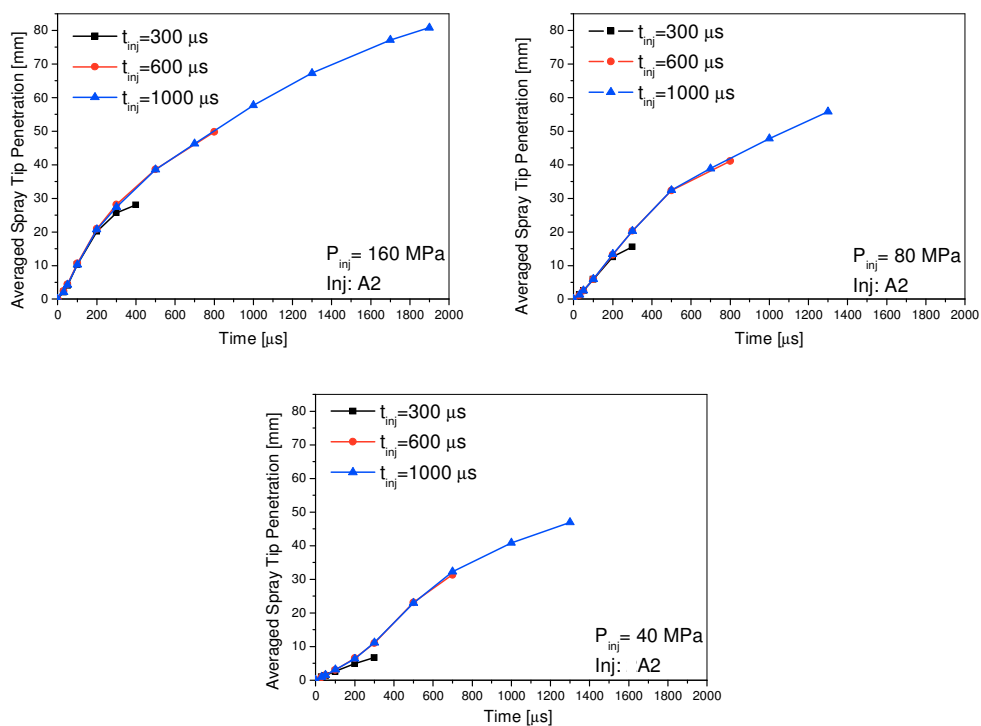


Fig. V.22: Curve di penetrazione media per la coppia A2

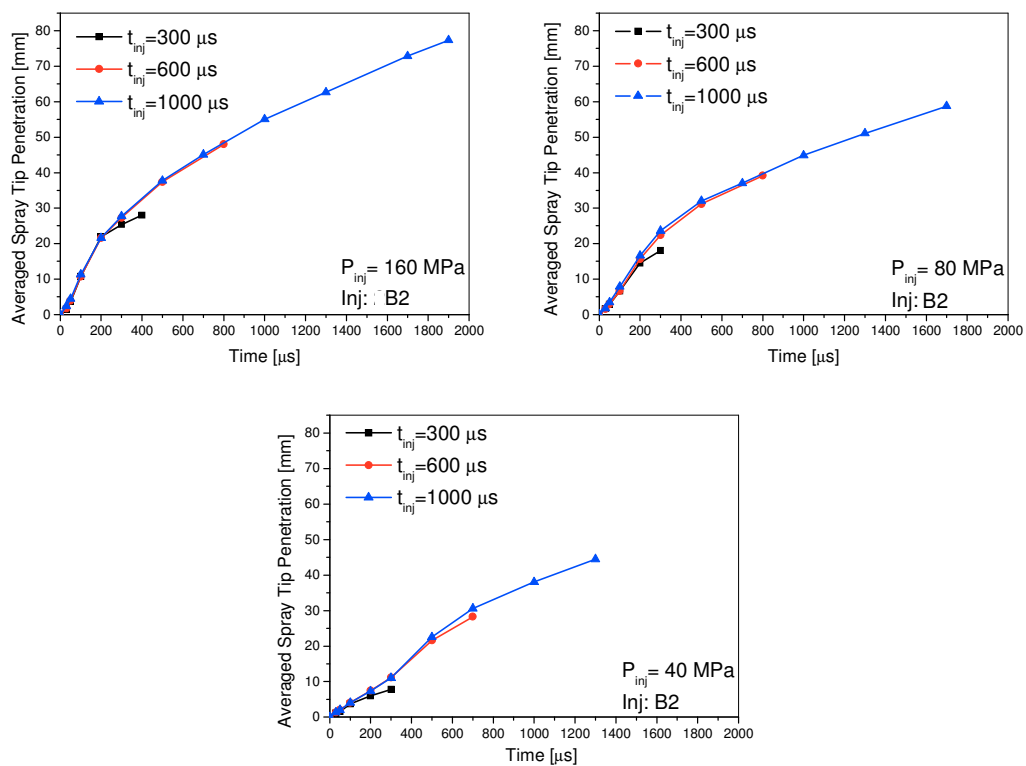


Fig. V.23: Curve di penetrazione media per la coppia B2

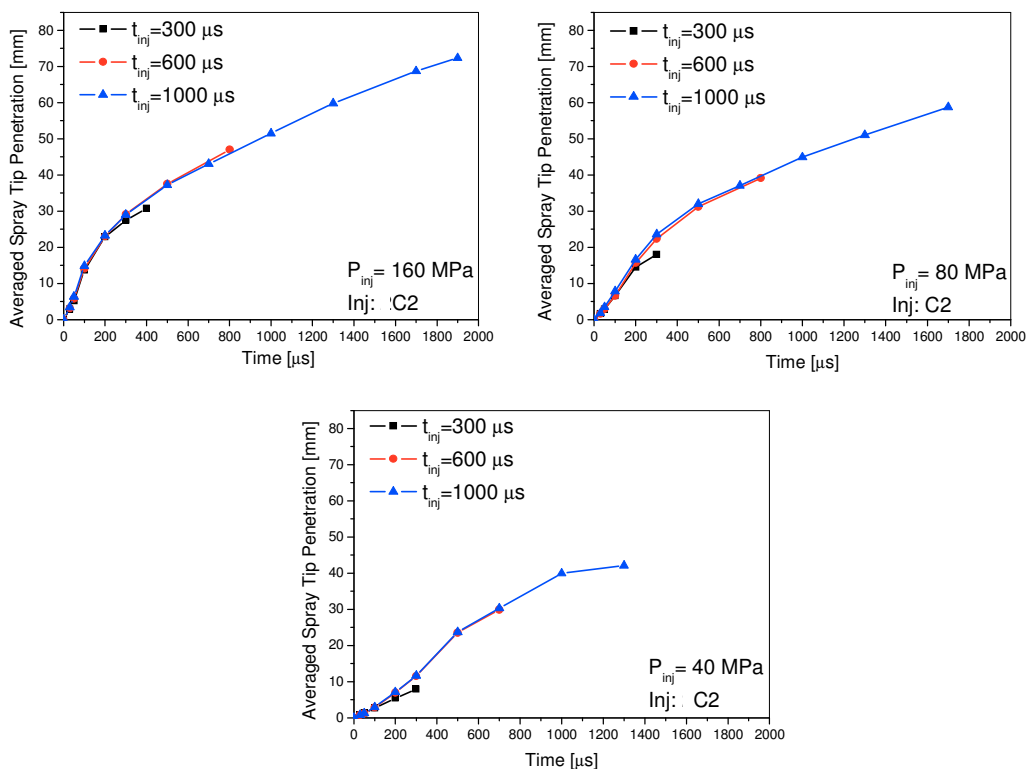


Fig. V.24: Curve di penetrazione media per la coppia C2

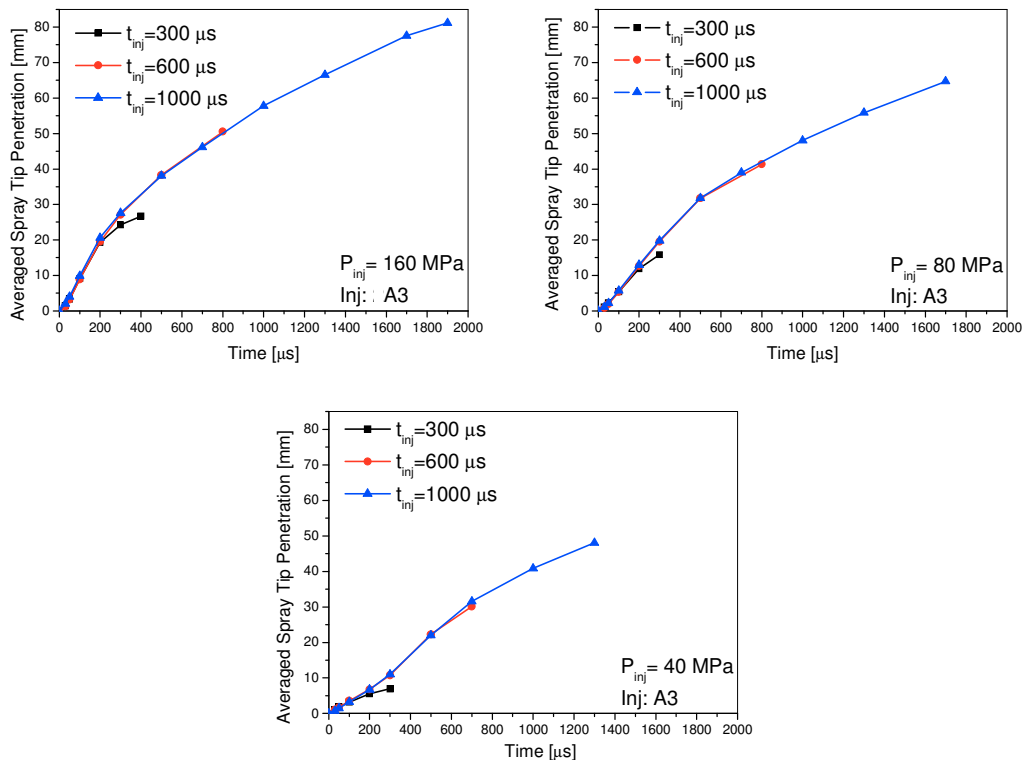


Fig. V.25: Curve di penetrazione media per la coppia A3

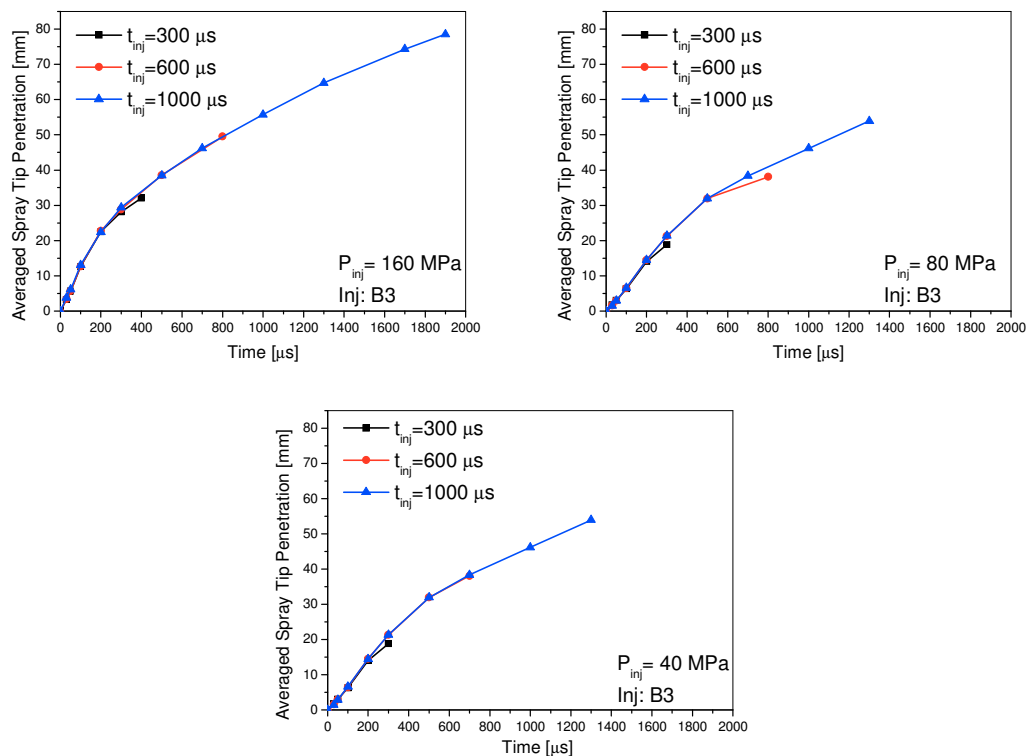


Fig. V.26: Curve di penetrazione media per la coppia B3

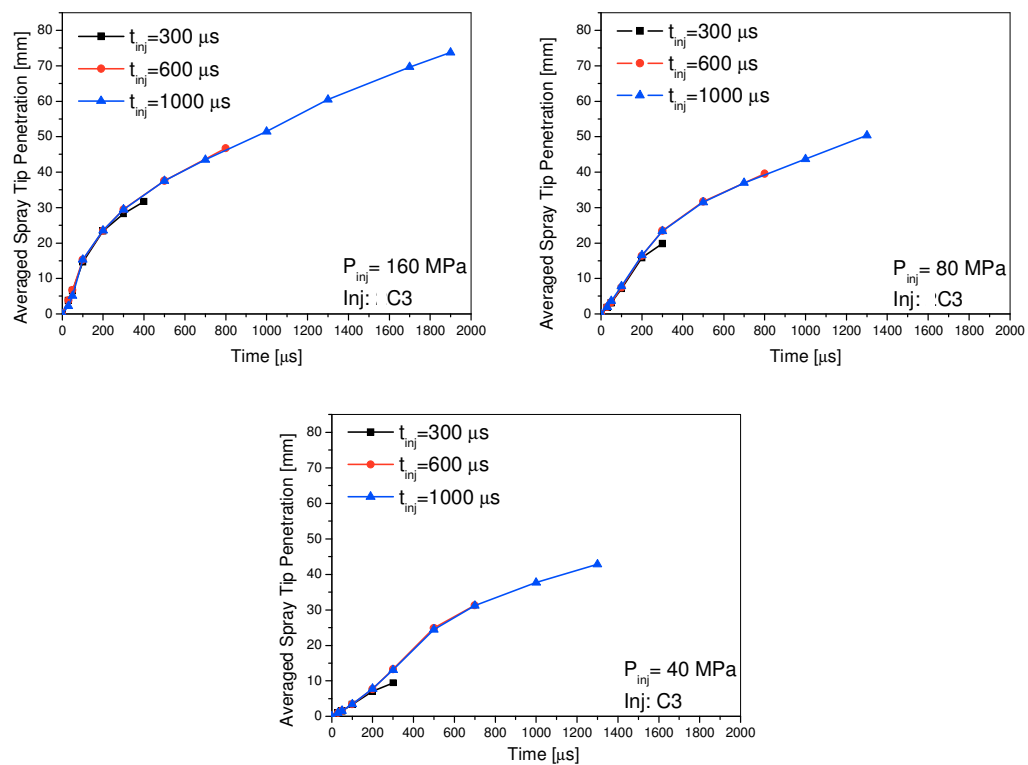


Fig. V.27: Curve di penetrazione media per la coppia C3

Come si osserva dalle figure precedenti, le curve di penetrazione media ricavate mostrano un funzionamento omogeneo degli iniettori. Le evidenze sperimentali mostrano, che per quanto riguarda le curve di penetrazione di getti in camera, il comportamento dei 3 iniettori è indipendente dal combustibile. Sia per il gasolio sia per l'RME e l'RME invecchiato gli iniettori hanno comportamenti analoghi e valori prossimi di lunghezza delle penetrazioni medie per condizioni di funzionamento omologhe.

Ogni curva presenta tre tratti caratteristici:

- ✓ Il primo, a forte pendenza, rappresenta il getto nei primi istanti dell'iniezione. Poiché l'interazione con la contropressione è ancora poco presente, il getto tende a penetrare compatto nella camera, governato essenzialmente dalla sola pressione a monte. Siamo nel tratto di comportamento lineare della penetrazione nel tempo.
- ✓ Nel secondo si vede un "ginocchio" della curva con valori di pendenza minori. È in questi istanti che si comincia ad avere una più significativa interazione con la contropressione in camera. Le gocce di elevate dimensioni tendono ad accumulare energia sulla superficie esterna. Tale energia provoca, superato un certo limite d'instabilità, la rottura delle stesse, dando luogo a gocce più piccole. Cioè il getto evolve verso una condizione di equilibrio a minore livello energetico, che rappresenta anche una situazione di maggiore stabilità per tutte le gocce che lo compongono. Il valore del "ginocchio" è riconosciuto in letteratura, come lunghezza di break up.
- ✓ Nel terzo tratto l'andamento delle penetrazioni ha andamento tipico di radice quadrata. Il getto tende ad una condizione di regime che vede una forte riduzione della quantità di moto dello stesso.

Nel tratto iniziale le curve si sovrappongono. Questo, conferma quanto già precedentemente affermato, la regolarità del sistema di iniezione.

Si può, altresì, notare che all'aumentare della pressione d'iniezione aumentano sia la penetrazione media che la durata dell'iniezione stessa, come risultava del resto anche dall'analisi del fuel injection rate.

Negli istanti iniziali la curva presenta una forte pendenza, per poi diminuire verso gli istanti finali dell'iniezione.

Questo fatto è riscontrabile soprattutto per $ET = 1 \text{ ms}$ e $ET = 0,6 \text{ ms}$, meno per $ET = 0,3 \text{ ms}$.

La pendenza maggiore negli istanti iniziali rispetto l'intera durata dell'iniezione è dovuta al fatto che inizialmente la quantità di moto posseduta dal fluido vince sul valore di contropressione in camera dovuto dalla densità dell'aria, successivamente prende il sopravvento la densità in camera che, opponendosi al moto fa sì che diminuisce l'azione penetrativa dello spray e quindi la pendenza diminuisce fino a stabilizzarsi intorno ad un valore costante per tutti e tre i grafici riportati in ciascuna figura.

Queste peculiarità caratterizzano anche i successivi diagrammi, allorché possiamo affermare che è una proprietà intrinseca degli iniettori che esplicita il funzionamento omogeneo degli iniettori.

Una peculiarità che si ripete pedissequamente negli esperimenti fa sì che si può definire una qualità o per contro una non conformità dell'articolo di prova.

Nelle figure seguenti (Figg.V.28, V.29 e V.30) si è voluto evidenziare l'influenza della geometria del nozzle dell'iniettore a parità di pressione d'iniezione e tempo di energizzazione ET (1 ms) per i 3 combustibili testati. Negli istanti iniziali l'iniettore C presenta una penetrazione media maggiore, l'iniettore B intermedia mentre l'iniettore A è quello che ha la penetrazione media minore. Tale fenomeno è imputabile al fatto che negli istanti iniziali per gli iniettori a diametro minore è riscontrata una maggiore velocità del getto perché, essendo il fluido incomprimibile, a parità di quantità di moto in uscita dal polverizzatore una sezione inferiore di uscita genera velocità di uscita maggiori. A tempi successivi quando poi il moto si è sviluppato le curve di penetrazione media si dispongono in ordine proporzionale ai diametri dei fori dei polverizzatori. Infatti a parità di velocità, che è funzione del Δp , maggiore è il diametro dei fori di efflusso più massa di combustibile viene iniettata. La maggiore risultante della quantità di moto si traduce in maggiori lunghezze di penetrazione. A conferma di tale ipotesi si può evidenziare che al diminuire della pressione il punto di inversione delle penetrazioni si sposta verso tempi più elevati. Infatti a pressioni più basse i tempi di sviluppo del moto sono maggiori.

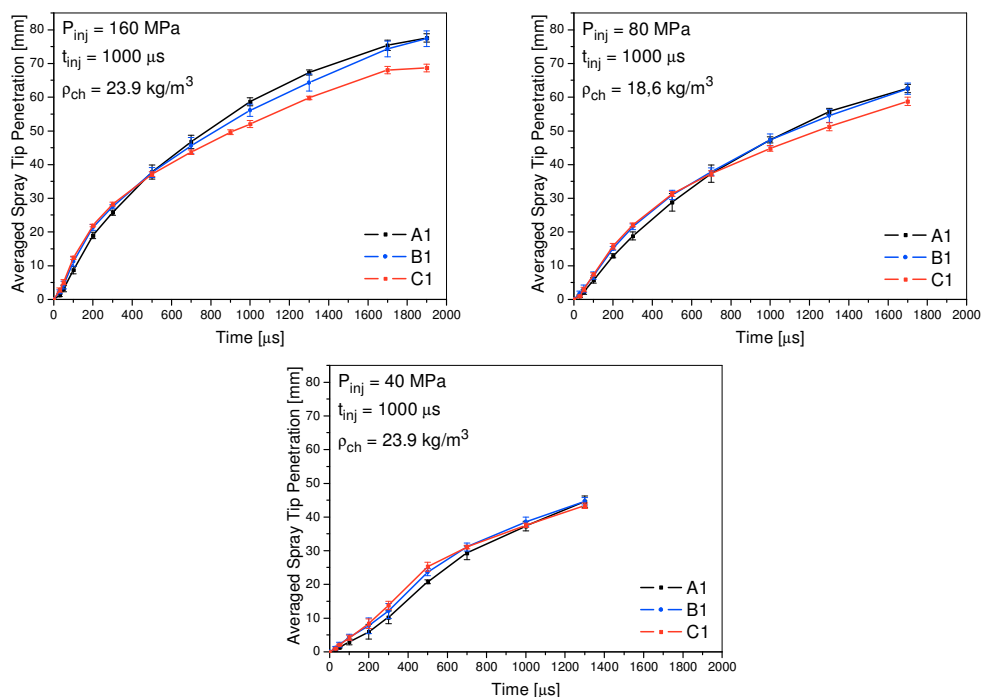


Fig. V.28: Confronto tra le curve di penetrazione media per le coppie A1, B1, C1

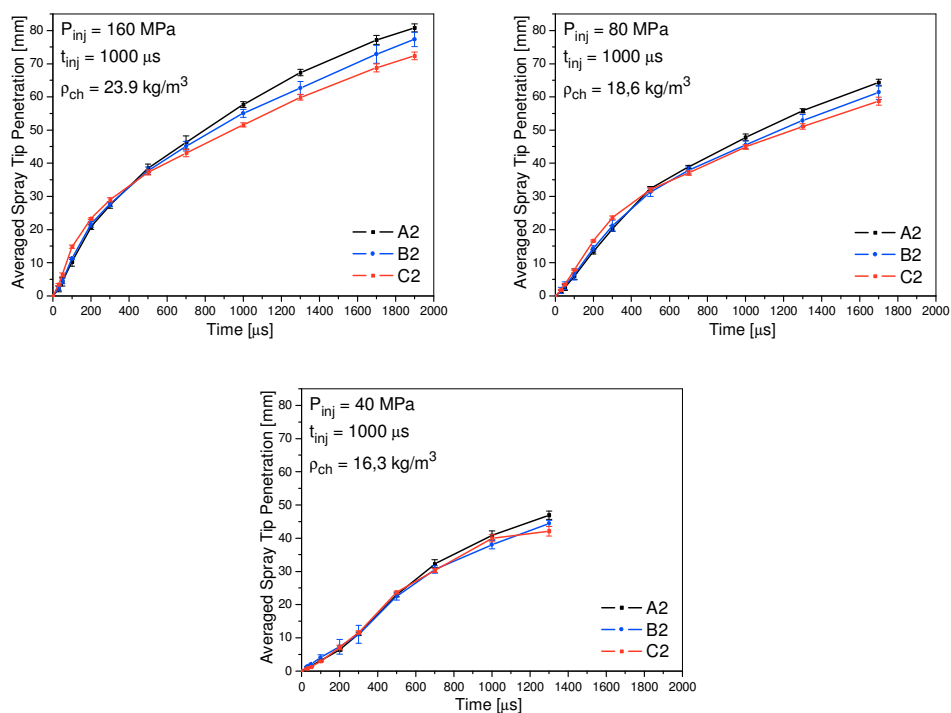


Fig. V.29: Confronto tra le curve di penetrazione media per le coppie A2, B2, C2

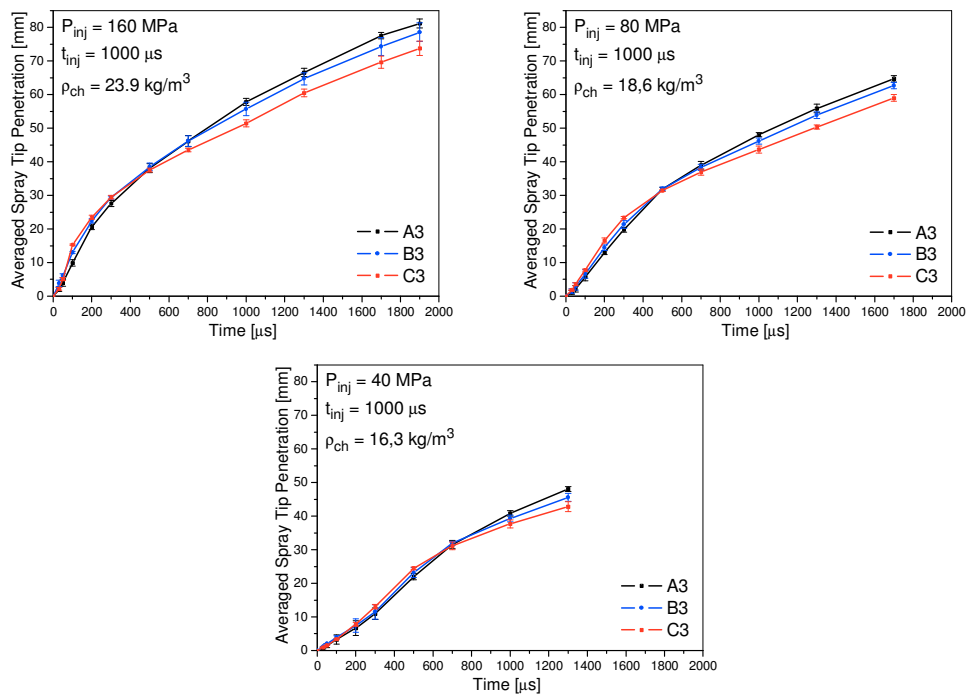


Fig. V.30: Confronto tra le curve di penetrazione media per le coppie A3, B3, C3

Nella figura V.31 viene mostrato, per la pressione d'iniezione di 160 MPa ed ET di 1000 μ s, l'effetto che le diverse caratteristiche chimico-fisiche dei combustibili comportano su ciascun tipo di iniettore. I profili delle curve di penetrazione mostrano che la penetrazione e propagazione dei getti in camera, per tutti gli iniettori testati, non sono suscettibili dai combustibili testati, ovverosia non vi è una ben definita dipendenza dai 3 combustibili utilizzati nella sperimentazione.

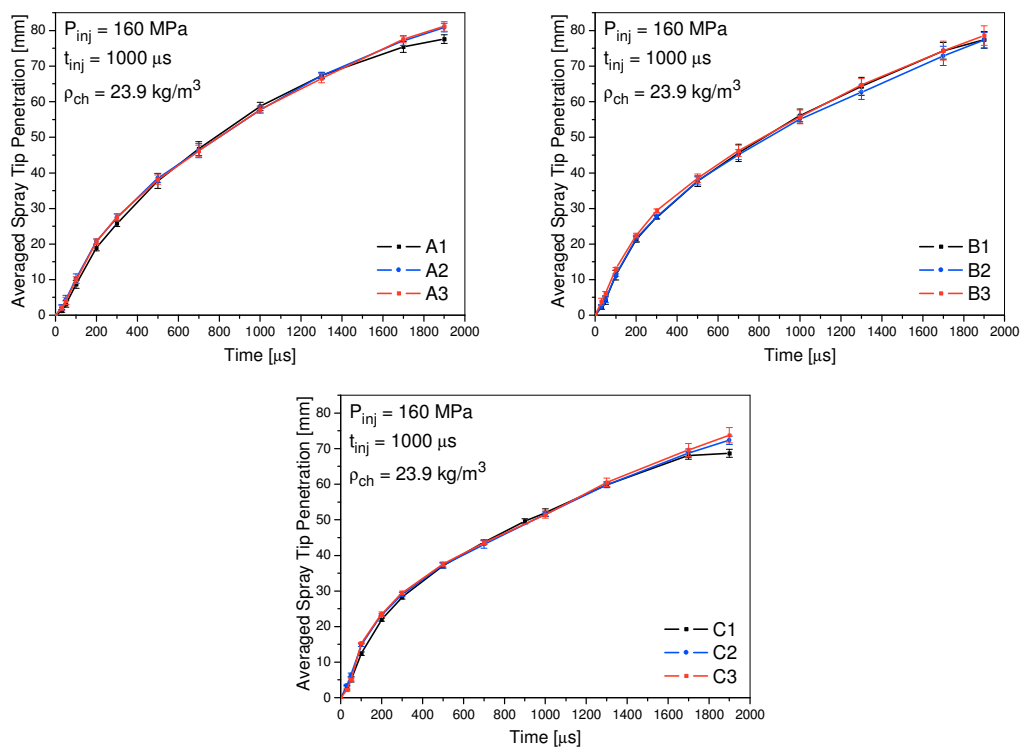


Fig. V.31: Influenza del combustibile sulle penetrazioni medie di ciascun tipo di iniettore testato

Le misurazioni si sono concluse con la determinazione degli angoli di cono nelle condizioni di spray completamente sviluppato per ciascun combustibile alle diverse pressioni d'iniezione. Nelle figure V.32, V.33 e V.34 è stato riportato in ascissa il tipo di pulverizzatore ed in ordinata l'angolo di cono in gradi.

Dai grafici si evince che gli andamenti degli angoli di cono non hanno un trend ben definito. Possiamo affermare per ogni condizione di pressioni d'iniezione, l'angolo di cono maggiore si ottiene per la famiglia di iniettori A con l'RME invecchiato e per la famiglia di iniettori C con il gasolio. Mentre per la famiglia di iniettori B si ottiene il valore dell'angolo di cono minore utilizzando l'RME invecchiato.

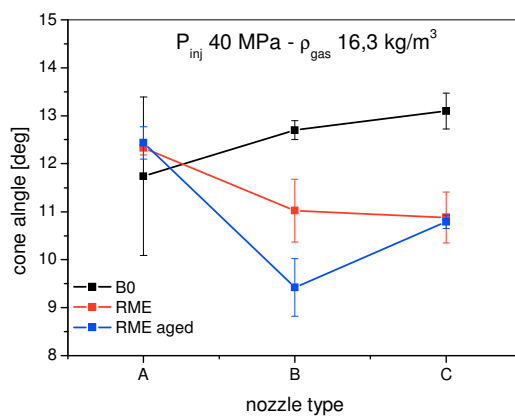


Fig. V.32: Angoli di cono medi in per tutti gli iniettori testati per $p_{inj} = 40 \text{ MPa}$.

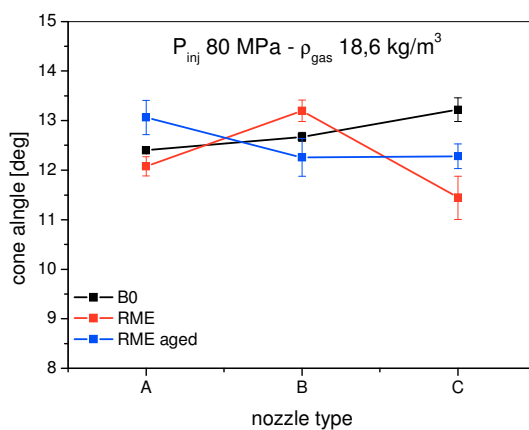


Fig. V.33: Angoli di cono medi per tutti gli iniettori testati per $p_{inj} = 80 \text{ MPa}$

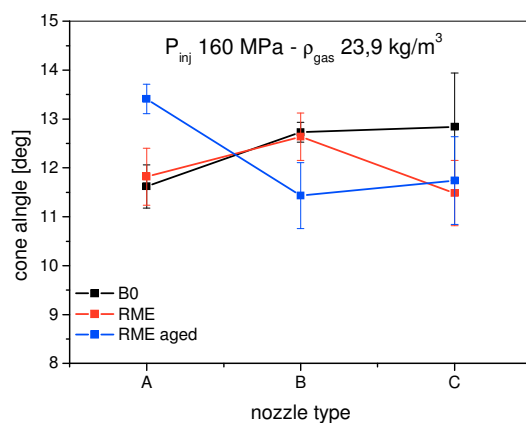


Fig. V.34: Angoli di cono medi per tutti gli iniettori testati per $p_{inj} = 160 \text{ MPa}$.

Bibliografia

- [1] Allocca L, Corcione FE, Costa M., *Numerical and Experimental Analysis of Multiple Injection Diesel Sprays*,. Spring F&L Meeting & Exhibition, Toulouse 2004 – SAE Paper 2004-01-1879

CONCLUSIONI

Obiettivo della presente tesi è stato la caratterizzazione sia in termini di fuel injecton rate sia del comportamento spaziale e temporale di getti tra combustibili: un gasolio di origine minerale e due biodiesel (RME ed RME invecchiato). I getti sono stati generati da un sistema di iniezione ad alta pressione Common Rail per motori diesel EURO5 in ambiente a pressione controllata.

Presso il “Laboratorio Spray” dell’Istituto Motori del Consiglio Nazionale delle Ricerche, sito in Napoli, è stato allestito un banco di prova che consente la determinazione di parametri caratteristici dello “spray” (portata istantanea e totale per strategie d’iniezione, distribuzione spaziale e temporale del fluido iniettato, penetrazione e velocità del tip, angolo del cono del getto) in funzione di parametri d’iniezione pressione, durata e contropressione in camera quiescente (riempita con del gas inerte in condizioni di densità tipiche motoristiche).

La sperimentazione ha visto la caratterizzazione della risposta dinamica di tre elettroiniettori multiforo alimentati con due differenti tipi di biodiesel e gasolio minerale alle diverse strategie di iniezione, l’analisi del comportamento spazio – temporale dei getti e il confronto dei risultati.

Non sono state riscontrate apprezzabili differenze in termini di quantità di combustibile iniettate al variare delle caratteristiche chimico/fisiche dei combustibili utilizzati. Per ciascuno degli elettroiniettori testati i profili di iniezione relativi ai tre diversi combustibili sono regolari con similitudini di forma e *rise time*.

A parità di combustibile e di strategia di iniezione è emerso un leggero ritardo alla chiusura (e quindi una maggiore durata di iniezione) per gli elettroiniettori aventi flussaggio minore.

L’analisi morfologica e l’evoluzione spazio/temporale degli spray è stata condotta iniettando combustibile in una camera otticamente accessibile a pressione controllata e a temperatura ambiente realizzanti densità tipiche motoristiche.

A tal riguardo i maggiori risultati emersi sono:

- ✓ Gli iniettori a maggiore (“A”) e medio (“B”) flussaggio mostrano una certa instabilità nei primi istanti (fino a 200 μ s) dall’inizio dell’iniezione;
- ✓ Gli iniettori a più basso flussaggio “C” evidenziano una struttura uniforme degli spray già dai primi istanti indicativo di una buona stabilità del processo d’iniezione sin dall’inizio;

- ✓ Per tutti gli iniettori e combustibili utilizzati si è osservato un trend regolare dei profili delle penetrazioni assiali nel tempo e non è emersa alcuna significativa dipendenza del comportamento degli spray dalle diverse caratteristiche chimico/fisiche dei combustibili.